

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Pongrac

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Ćorić

Student:

Marko Pongrac

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Danku Ćoriću na ukazanom strpljenju i velikoj pomoći.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 6 -09- 2016	Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3	
Ur.broj: 15-1703-16-304	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARKO PONGRAC**

Mat. br.: **0035126625**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **MATERIJALI ZA TLAČNE POSUDE**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **MATERIALS FOR PRESSURE VESSELS**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati materijale koji se koriste za posude pod tlakom s posebnim osvrtom na metalne materijale. Budući da se radi o materijalima od kojih se izrađuju lomno-kritične konstrukcije potrebno je definirati specifične zahtjeve koji se postavljaju na materijal kao i pripadajuća svojstva materijala. Nadalje potrebno je detaljno opisati skupine čelika kao što su opći konstrukcijski čelici, čelici povišene čvrstoće, visokočvrsti i ultračvrsti čelici, nehrđajući čelici, čelici za povišene i visoke temperature te čelici za niske i snižene temperature. Za svaku od navedenih skupina čelika potrebno je istaknuti karakteristične primjere primjene.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

25. travnja 2016.

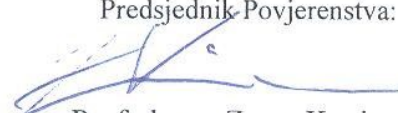
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Danko Čorić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

Sadržaj	I
Popis slika	III
Popis tablica	IV
Popis oznaka.....	V
Sažetak.....	VII
Summary.....	VIII
1. Uvod.....	1
2. Materijali za tlačnu opremu.....	3
3. Zahtjevi na materijale za dijelove pod tlakom.....	4
3.1. Zahtjevi na opterećenje i na pojavu krhkog loma.....	4
3.2. Zahtjevi na zavarljivost.....	8
4. Čelici i čelični ljevovi za tlačnu opremu.....	9
4.1. Mikrostruktura čelika i utjecaj legiranih elemenata.....	9
4.2. Klasifikacija čelika za tlačnu opremu prema normi EN 13445-2.....	14
4.3. Opći konstrukcijski čelici i čelični ljevovi.....	15
4.4. Čelici povišene čvrstoće.....	16
4.4.1. Sitnozrnati normalizirani mikrolegirani čelici (HSLA).....	17
4.4.2. Sitnozrnati poboljšani čelici.....	19
4.5. Visokočvrsti i ultračvrsti čelici	20
4.5.1. Niskolegirani niskopopušteni čelici.....	21
4.5.2. Visokolegirani viskopopušteni čelici.....	21
4.5.3. Temomehanički obrađeni čelici.....	22
4.5.4. Korozijski postojani precipitacijski očvrnuti čelici	25
4.5.5. Maraging čelici	26
4.5.6. Primjena visokočvrstih i ultračvrstih čelika.....	27
4.6. Korozijski postojani čelici.....	28
4.6.1. Martenzitni korozijski postojani čelici.....	29
4.6.2. Feritni korozijski postojani čelici.....	30

4.6.3. Martenzitno-feritni korozijski postojani čelici.....	31
4.6.4. Austenitni korozijski postojani čelici.....	32
4.6.5. Dupleks (austenitno-feritni) čelici.....	33
4.6.6. Primjena korozijski postojanih čelika.....	35
4.7. Čelici za povišene i visoke temperature.....	35
4.7.1. Ugljični (nelegirani) čelici.....	38
4.7.2. Niskolegirani Mo i Mo-Cr čelici.....	38
4.7.3. Visokolegirani super 12% Cr martenzitni čelici.....	39
4.7.4. Visokolegirani austenitni Cr-Ni čelici.....	40
4.7.5. Vatrootporni čelici.....	40
4.7.6. Primjena čelika za povišene i visoke temperature.....	41
4.8. Čelici za niske i snižene temperature.....	42
4.8.1. Primjena čelika za niske i snižene tempearture.....	44
5. Kompozitni materijali.....	45
6. Neželjezne legure.....	47
7. Zaključak.....	49
8. Literatura.....	50
9. Prilog.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1 – Tlačni spremnik.....	1
Slika 2 – Primjeri raznih oblika tlačnih spremnika, 1) kuglasti, 2) valjkasti, 3) stožasti.....	1
Slika 3 – Dijagram naprežanje-istezanje za normalizirani konstrukcijski čelik.....	5
Slika 4 – Dijagram naprežanje-istezanje za različite skupine materijala.....	6
Slika 5 – Ispitivanje udarnog rada loma prema Charpyju	7
Slika 6 – Fe-C dijagram stanja za metastabilnu kristalizaciju.....	9
Slika 7 – TTT dijagram za kontinuirano hlađenje (podeutektoidnog čelika sa x% ugljika).....	10
Slika 8 – Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika	10
Slika 9 – Austenitna mikrostruktura kod čelika.....	11
Slika 10 – Feritno-perlitna mikrostruktura (ferit-bijelo, perlit-crno).....	11
Slika 11 – Čelik martenzitne mikrostrukture	12
Slika 12 – Čelik bainitne mikrostrukture.....	12
Slika 13 – Tlačni spremnik za transport tekućih plinova.....	18
Slika 14 – Kuglasti tlačni spremnik za plinove	20
Slika 15 – Dijagram postupka TRIP.....	23
Slika 16 – Dijagram perliforming postupka - kontinuirani i izotermički.....	23
Slika 17 – Dijagram isoforming postupka prikazan u izotermičkom TTT dijagramu.....	24
Slika 18 – Postupak marforming – dinamičko deformacijsko starenje	24
Slika 19 – Toplinska obrada martenzitnih PH-čelika	25
Slika 20 – Dijagram postupka toplinske obrade maraging čelika	27
Slika 21 – Kućište raketnog motora izrađenog od "maraging" čelika.....	28
Slika 22 – Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70% Fe.....	34
Slika 23 – Tlačni spremnik izrađen od dupleks nehrđajućeg čelika.....	35
Slika 24 – Boce za ronjenje izrađene od austenitnog nehrđajućeg čelika.....	35
Slika 25 – Promjena mehaničkih svojstava s povišenjem temperature.....	36
Slika 26 – Pojava puzanja pri visokim temperaturama.....	36
Slika 27 – Promjena savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika povišenjem temperature...37	
Slika 28 – Dijagrami postupaka toplinske obrade austenitnih toplinski visokopostojanih čelika.....40	
Slika 29 – Parni kotao izrađen od ugljičnog (nelegiranog) čelika.....	41
Slika 30 – Kućište raketnog motora izrađeno od visokolegiranog Cr-Ni čelika.....	42
Slika 31 – Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi za razne materijale.....	42
Slika 32 – Ovisnost KV o temperaturi tipičnih vrsta čelika za rad pri niskim temperaturama	43
Slika 33 – Spremnik tekućeg dušika.....	44
Slika 34 – Tlačni spremnici od polimernog kompozita	46
Slika 35 – Tlačni spremnik izrađen od aluminija.....	47
Slika 36 – Tlačni spremnik izrađen od Ni-legure	48

POPIS TABLICA

Tablica 1 – Sitnozrnati normalizirani mikrolegirani čelici (HSLA) – kemijski sastav.....	18
Tablica 2 – Sitnozrnati normalizirani mikrolegirani čelici (HSLA) - mehanička svojstva.....	18
Tablica 3 – Sitnozrnati poboljšani čelici - kemijski sastav.....	19
Tablica 4 – Sitnozrnati poboljšani čelici - mehanička svojstva.....	19
Tablica 5 – Niskolegirani niskopopušteni čelici - mehanička svojstva i kemijski sastav.....	21
Tablica 6 – Visokolegirani visokopopušteni čelici - mehanička svojstva i kemijski sastav.....	22
Tablica 7 – Mehanička svojstva isoforming obrađenih čelika.....	24
Tablica 8 – Mehanička svojstva poluastenitnih PH-čelika.....	26
Tablica 9 – Parametri toplinske obrade i mehanička svojstva austenitnih PH-čelika.....	26
Tablica 10 – Mehanička svojstva "maraging" čelika.....	27
Tablica 11 – Kemijski sastav martenzitnih nehrđajućih čelika	30
Tablica 12 – Mehanička svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika	30
Tablica 13 – Mehanička svojstva feritnih nehrđajućih čelika.....	31
Tablica 14 – Austenitni nehrđajući čelici – kemijski sastav.....	32
Tablica 15 – Austenitni nehrđajući čelici - mehanička svojstva.....	33
Tablica 16 – Dupleks nehrđajući čelici - kemijski sastav.....	34
Tablica 17 – Dupleks nehrđajući čelici - mehanička svojstva.....	34
Tablica 18 – Nelegirani čelici za kotlovske limove (izvod iz DIN-a 17175)	38
Tablica 19 – Niskolegirani Mo i Mo-Cr čelici za rad pri visokim temperaturama	39
Tablica 20 – Visokolegirani super 12% Cr martenzitni čelici – mehanička svojstva.....	39
Tablica 21 – Vatrootporni čelici.....	41
Tablica 22 – Čelici za niske temperature - kemijski sastav.....	44
Tablica 23 – Čelici za niske temperature - mehanička svojstva.....	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	istezljivost
A_5	%	istezljivost
A_g	%	istezljivost pri radnoj temperaturi
E	N/mm ²	modul elastičnosti
E_g	N/mm ²	modul elastičnosti pri radnoj tempertaui
F	N	sila
K_{IC}	N/mm ^{-3/2}	lomna žilavost
KU, KV	J	udarni rad loma po Charyju ("U" ili "V" urez)
L	mm	duljina
L_0	mm	početna duljina
p	N/m ²	tlak
R_d	N/mm ²	dinamička izdržljivost
$R_{DVM/g}$	N/mm ²	granica puzanja po DVM pri definiranoj temperaturi
R_e	N/mm ²	granica razvlačenja
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
$R_{m/g}$	N/mm ²	vlačna čvrstoća pri radnoj temperaturi
$R_{p0,2}$	N/mm ²	konvencionalna granica razvlačenja
$R_{p0,2/g}$	N/mm ²	konvencionalna granica razvlačenja pri radnoj temperaturi
$R_{p1/t/g}$	N/mm ²	granica puzanja
S_0	mm ²	ploština poprečnog presjeka
T	K	Kelvinova temperatura
T_{puz}	K	temperatura puzanja
ε	mm/mm	istezanje
σ	N/mm ²	naprezanje
ϑ	°C	Celziusova temperatura
ϑ_A	°C	temperatura austenitizacije
ϑ_d	°C	temperatura dozrijevanja

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ_P	°C	temperatura popuštanja
ϑ_{Prel}	°C	prijelazna temperatura žilavosti
ϑ_R	°C	radna temperatura
$\vartheta_{r\dot{z}}$	°C	temperatura rastvornog žarenja
ϑ_t	°C	temperatura tališta

SAŽETAK

Tema ovog rada su materijali za izradu tlačnih spremnika. Tlačni spremnici su konstrukcije kod kojih postoje posebni zahtjevi na svojstva materijala koja su propisana normama. Za tlačne spremnike koriste se razne vrste materijala sa različitim svojstvima. Na osnovu proračuna u fazi konstruiranja spremnika, pa zatim svojstava i cijene pojedinih materijala, donose se odluke koji od materijala je prikladan za izradu spremnika za pojedinu specifičnu namjenu.

SUMMARY

This paper outlines materials for pressure vessels. Pressure vessels are structures for which there are special requirements on material properties which are prescribed by norms. Various types of materials with different properties are used for pressure vessels. Based on calculations at the construction design phase of the vessel, and then the properties and prices of certain materials, decisions are made for which material is suitable as a pressure vessel material for a single specific purpose.

1. Uvod

Tlačni spremnici (Slika 1) su spremnici konstruirani da mogu držati plinove i tekućine čiji se tlak znatno razlikuje od tlaka okoliša. Tu spadaju: parni kotlovi, posude u procesnoj industriji i razni drugi spremnici.



Slika 1 – Tlačni spremnik

Kod tlačnih spremnika uvijek postoji opasnost od kobnih nesreća, pa je stoga njihovo konstruiranje, proizvodnja i rad regulirano strogim zakonskim propisima. Proračuni kao bitne parametre uvijek uključuju maksimalni dozvoljeni radni tlak, otpornost na koroziju, minimalnu i maksimalnu radnu temperaturu i faktore sigurnosti koji su često visoki u usporedbi sa nekim drugim tipovima konstrukcija. Također je vrlo bitno provođenje nerazornih ispitivanja tokom radnog vijeka opreme koje uključuju ultrazvučna ispitivanja, radiografiju i tlačne probe.

Tlačni spremnici se teoretski mogu konstruirati u bilo kojem obliku, no najčešće su konstruirani u obliku kugle, valjka ili stošca. Složeniji oblici tlačnih spremnika su teži za proračun i teže ih je proizvesti.



1)



2)



3)

Slika 2 – Primjeri raznih oblika tlačnih spremnika, 1) kuglasti, 2) valjkasti, 3) stožasti

Tlačna oprema mora biti konstruirana za opterećenja koja odgovaraju njezinoj namjeni te za druge

predvidljive uvjete rada. Posebno se moraju uzeti u obzir sljedeći faktori:

- unutarnji/vanjski tlak,
- temperatura okoline i radna temperatura,
- statički tlak i masa sadržaja u probnim uvjetima i uvjetima rada,
- opterećenja vezana za promet, vjetar, potres,
- sile reakcija i momenti koji proizlaze od oslonaca, priključaka, cijevi, itd.
- korozija i erozija, umor materijala itd.,
- razdvajanje nestabilnih fluida.

Moraju se uzeti u obzir razna opterećenja koja se javljaju istovremeno, uzimajući u obzir mogućnost njihovog istovremenog nastupanja. Konstrukcija na odgovarajuću čvrstoću se mora temeljiti na metodi proračuna opisanoj u točki 1.

1. Metoda proračuna

a) Tlačna i druga opterećenja

Dopuštena naprezanja tlačne opreme moraju biti ograničena obzirom na očekivane razumne načine otkazivanja u uvjetima rada. Zato se moraju primijeniti odgovarajući faktori sigurnosti kako bi se u potpunosti odstranila svaka nesigurnost koja proizlazi iz proizvodnje, stvarnih uvjeta rada, naprezanja, metode proračuna te svojstava i ponašanja materijala.

Gore navedenim zahtjevima se može udovoljiti na način da se, prema potrebi, primijeni jedna od sljedećih metoda ili, ako je neophodno, koristi kao dodatak jednoj ili u kombinaciji s drugom metodom:

- konstrukcija putem formula,
- konstrukcija putem analize,
- konstrukcija putem mehanike loma.

b) Izdržljivost

Prilikom konstruiranja moraju se koristiti odgovarajući proračuni kako bi se utvrdila izdržljivost određene tlačne opreme.

Posebice:

- proračunski tlakovi ne smiju biti manji od najvećih dopuštenih tlakova uzevši u obzir statički i dinamički tlak fluida te razdvajanje nestabilnih fluida. Kada je posuda podijeljena na zasebne komore koje su pod tlakom, pregradna stijenka mora biti konstruirana na temelju najvećeg mogućeg tlaka komore u odnosu na najmanji mogući tlak u susjednoj komori,
- proračunske temperature moraju uzeti u obzir odgovarajuće sigurnosne granice,
- konstrukcija mora voditi računa o svim mogućim kombinacijama temperature i tlaka do kojih može doći u realno očekivanim uvjetima rada tlačne opreme,
- najveća naprezanja i koncentracije naprezanja moraju biti u dopuštenim granicama,
- pri proračunu na tlak moraju se koristiti vrijednosti koje odgovaraju svojstvima materijala, temeljenih na dokumentiranim podacima zajedno s odgovarajućim faktorima sigurnosti.

c) Stabilnost

Kada izračunata debljina stijenke ne uključuje odgovarajuću stabilnost strukture, moraju se poduzeti nužne mjere kako bi se to ispravilo uzimajući u obzir rizike pri prijevozu i rukovanju.

Materijali koji se koriste za proizvodnju tlačne opreme moraju odgovarati toj primjeni u predviđenom vijeku trajanja ukoliko nisu predviđene zamjene.

2. Materijali za tlačnu opremu

Materijali za dijelove pod tlakom moraju imati odgovarajuća svojstva za sve radne uvjete koji se mogu predvidjeti i za sve uvjete ispitivanja, a posebno moraju biti dovoljno plastični i žilavi. Potrebna je izuzetna pažnja pri odabiru materijala kako bi se spriječio krhki lom. Kada je iz određenih razloga nužno koristiti krhki materijal moraju se poduzeti odgovarajuće mjere.

Materijali moraju biti dovoljno kemijski otporni na fluide koje se nalaze u tlačnoj opremi. Kemijska i fizikalna svojstva nužna za siguran rad ne smiju biti značajno umanjena u predviđenom vijeku trajanja opreme.

Osim toga materijali ne smiju biti značajno podložni dozrijevanju i moraju odgovarati za predviđene postupke obrade.

Moraju se odabrati na način da se izbjegnu međusobni nepoželjni učinci kada se spajaju različiti materijali.

Proizvođač tlačne opreme mora na odgovarajući način odrediti vrijednosti potrebne za proračune i bitne karakteristike materijala s obzirom na područje uporabe.

U tehničkoj dokumentaciji proizvođač mora pružiti dokaze o sukladnosti upotrijebljenih materijala sa specifikacijama za materijale prema Pravilniku o tlačnoj opremi u jednom od sljedećih oblika:

- korištenjem materijala koji su u skladu s usklađenim normama,
- korištenjem materijala koji su obuhvaćeni europskim odobrenjem za materijale za tlačnu opremu,
- korištenjem posebno odobrenih materijala.

Proizvođač opreme mora poduzeti odgovarajuće mjere kako bi osigurao da upotrijebljeni materijali budu u skladu sa specifikacijama. Posebno, dokumentacija koju priprema proizvođač materijala, a koja potvrđuje sukladnost sa specifikacijom mora postojati za sve materijale. Kada proizvođač materijala ima odgovarajući sustav osiguranja kvalitete koji je potvrđen od strane mjerodavnog tijela, te koji je udovoljio posebnom ocjenjivanju za materijale, pretpostavlja se da certifikat koji izdaje proizvođač potvrđuje sukladnost s odgovarajućim zahtjevima *Pravilnika o tlačnoj opremi*.

3. Zahtjevi na materijale za dijelove pod tlakom

Osnovni zahtjevi na materijale za tlačnu opremu su:

- nosivost radnih opterećenja,
- sigurnost: plastična deformabilnost i otpornost krhkom lomu,
- kemijska otpornost,
- kompatibilnost materijala u spoju,
- otpornost dozrijevanju,
- tehnološkičnost.

3.1. Zahtjevi na opterećenje i na pojavu krhkog loma

U pogledu odabira materijala vrlo je bitno odrediti zahtjeve na sam materijal od kojih je konstrukcija izrađena, kao i određivanje bitnih svojstava materijala i minimalnih granica koje određuju da li je pojedini materijal prikladan za traženu namjenu.

Tlačni spremnik se jednostavno može opisati kao posuda unutar koje je tlak najčešće mnogo viši od tlaka izvan spremnika, što onda stvara pritisak na stjenke. Kod materijala od kojeg je izrađena stjenka javljaju se vlačna naprezanja, odnosno unutrašnji tlak stvara pritisak na posudu da se ona proširi i poveća volumen. Iz toga je jednostavno za zaključiti da su vlačna svojstva materijala puno bitnija od tlačnih. Bitan faktor je također vrijeme uporabe jer konstrukcija nije vlačno opterećena povremeno i na kratko, već je opterećenje konstantno kroz duži vremenski period.

Na osnovu zahtjeva na materijale za tlačnu opremu potrebno je odrediti i definirati tražena mehanička svojstva.

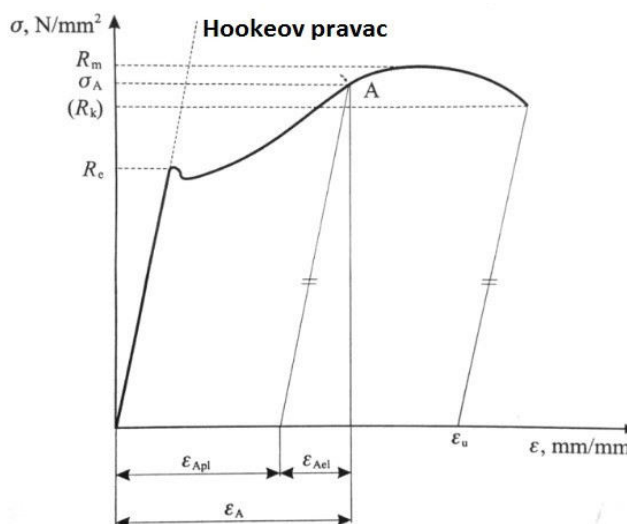
To su:

- granica razvlačenja, R_e ,
- konvencionalna granica razvlačenja na proračunskoj temperaturi za 0,2 ili 1% trajne deformacije, $R_{p0,2}$ i R_{p1} ,
- vlačna čvrstoća, R_m ,
- modul elastičnosti (Youngov modul), E ,
- odgovarajuća plastična deformacija,
- otpornost puzanju – statička izdržljivost i granica puzanja,
- dinamička izdržljivost, R_d ,
- udarni rad loma (udarna žilavost), KV ,
- lomna žilavost, K_{IC} .

Dopuštena naprezanja po pravilniku o tlačnoj opremi:

- za feritne čelike uključujući normalizirane (normalizirane valjane) čelike, a isključujući sitnozrnate čelike, a posebno toplinski obrađene čelike: $0,67 \cdot R_{e/T}$ i $0,42 \cdot R_{m/20}$,
- za austenitne čelike,
 - $0,67 \cdot R_{e/T}$: za $A \geq 30\%$
 - $0,83 \cdot R_{e/T}$ i $0,33 \cdot R_{m/T}$: za $A \geq 35\%$
- za nelegirane i niskolegirane čelične lijevove: $0,53 \cdot R_{e/T}$ i $0,33 \cdot R_{m/20}$,
- za aluminij: $0,67 \cdot R_{e/T}$,
- za precipitacijski neočvrstive Al-legure: $0,67 \cdot R_{e/T}$ i $0,42 \cdot R_{m/20}$.

Ponašanje materijala pod djelovanjem opterećenja prikazuje dijagram naprezanje (σ) – istezanje (ϵ) na slici 3.



Slika 3 – Dijagram naprezanje-istezanje za normalizirani konstrukcijski čelik

Naprezanje je omjer sile - F i ploštine - S_0 poprečnog presjeka epruvete. Kod materijala opterećenog nekom silom, dolazi do naprezanja zbog kojih se taj materijal rasteže i time dolazi do produljenja epruvete sa početne duljine L_0 na duljinu L . Relativno produljenje predstavlja omjer produljenja (razlika između L i L_0) i početne duljine L_0 .

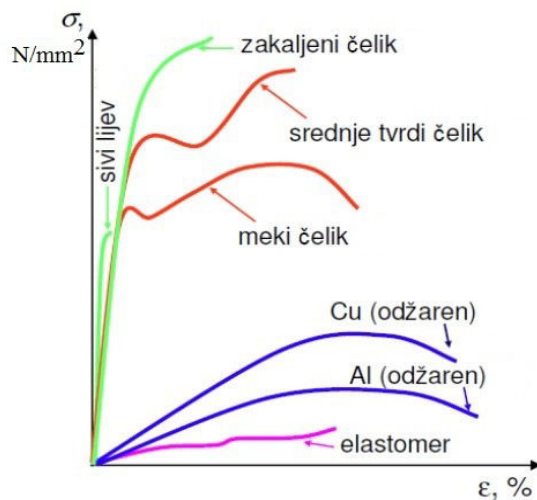
$$\sigma = \frac{F}{S_0} ; \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Karakteristične točke koje se mogu očitati iz dijagrama naprezanja su vlačna čvrstoća R_m , granica razvlačenja R_e i lomna čvrstoća R_k . U prvom dijelu dijagrama do točke R_e postoji linearna ovisnost između opterećenja i produljenja, odnosno ispitni uzorak se rasteže po Hookeovom zakonu. Deformacija materijala je elastična u ovom području i u slučaju prestanka opterećenja ispitni uzorak se vraća na početnu duljinu. Nakon te točke slijedi jedno malo područje koje se naziva zona tečenja i u kojem se ispitni uzorak produljuje čak i uz pad opterećenja. Nakon te zone, za daljnji porast produljenja opet je potrebno povećavati opterećenje, ali produljenje sa porastom opterećenja više ne raste linearno. Ovo je već područje plastične deformacije koja rasterećenjem ispitnog uzorka ne isčezava. Točka maksimalnog opterećenja na dijagramu predstavlja vlačnu čvrstoću R_m . I nakon te točke realno naprezanje ustvari raste jer se ispitni uzorak u zoni gdje će nastati lom naglo stanjuje, no kako se kod izrade dijagrama u obzir uzima samo početna ploština poprečnog presjeka ispitnog uzorka, ispada da nakon te točke naprezanje pada.

Tijek rastezanja različitih materijala se za svaki materijal odvija na njemu svojstven način (slika 4). Po obliku dijagrama materijali se mogu podijeliti na:

- materijale s izraženom granicom razvlačenja (meki i srednje tvrdi čelici),
- materijale s kontinuiranim prijelazom iz elastičnog u područje elastično-plastičnih deformacija (Cu i Al),
- materijale bez područja plastičnih deformacija (krhki materijali poput sivog lijeva ili zakaljenog čelika),
- materijale s entropijskom elastičnom deformacijom (neki organski materijali i polimeri)

tipa plastomera).



Slika 4 – Dijagram naprezanje-istezanje za različite skupine materijala

Granica razvlačenja, R_e (N/mm^2)

Granica razvlačenja je ono naprezanje pri vlačnom opterećenju koje izaziva znatno istezanje ispitnog uzorka ili epruvete, bez povećanja sile. Granica razvlačenja je uz vlačnu čvrstoću osnovno mehaničko svojstvo na osnovu kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti. Granica razvlačenja za pojedine materijale dobiva se statičkim vlačnim ispitivanjem na kidalici.

Konvencionalna granica razvlačenja, R_p (N/mm^2)

Konvencionalna granica razvlačenja je ono naprezanje u materijalu koje stvara dogovoreno produljenje ispitnog uzorka. Uobičajena vrijednost trajnog produljenja je 0,2%, ali koriste se i vrijednosti od 1%, 0,1% i druge. Konvencionalna granica razvlačenja se također određuje za različite temperature.

Vlačna čvrstoća, R_m (N/mm^2)

Vlačna čvrstoća predstavlja omjer maksimalne postignute sile pri vlačnom ispitivanju i ploštine početnog presjeka ispitnog uzorka ili epruvete.

Istezljivost, A (%)

Istezljivost A označava relativno produljenje materijala u aksijalnom smjeru u odnosu na početnu mjernu duljinu L_0 . Na osnovu istezljivosti materijali se međusobno uspoređuju u pogledu duktilnosti. Općenito se materijali sa istezljivošću manjom od 5% smatraju krhkima, a oni sa istezljivošću većom od 5% duktilnima.

Po normi EN 13445-2 čelici od kojih se izrađuju tlačni spremnici moraju imati određenu minimalnu istezljivost A kako slijedi:

- $A \geq 14\%$ za poprečni smjer
- $A \geq 16\%$ za uzdužni smjer

Materijali sa nižim vrijednostima istezljivosti mogu se primjeniti kod spojnih elemenata i odljevaka samo u slučaju poduzimanja odgovarajućih mjera (primjena viših faktora sigurnosti kod konstruiranja i provođenje dodatnih testova kako bi se ispitala lomna svojstva materijala).

Modul elastičnosti (Youngov modul), E (N/mm^2)

Modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i vlačne deformacije u linearnom odnosno elastičnom području dijagrama naprezanje-istezanje. Youngov modul elastičnosti vrijedi i za tlačna naprezanja kod većine materijala.

Otpornost puzanju, $R_{p1/2}$ (N/mm^2)

Puzanje je pojava koja se javlja kod dugotrajno statički opterećenih materijala, kod kojih pod utjecajem neke konstantne sile pri povišenoj temperaturi dolazi do postupnog povećanja deformacije. Puzanje se zaustavlja ukoliko kod materijala tokom procesa rastezanja dođe do očvrnuća ili ako ne, puzanje se nastavlja do loma materijala. Temperatura na kojoj će doći do pojave puzanja ovisi o materijalu (kod čelika iznad $400^\circ C$, a kod olova i nekih polimera već na sobnoj temperaturi). Ispitivanje otpornosti materijala puzanju provodi se na puzalicama, a kao ispitni uzorci koriste se epruvete s navojnim glavama.

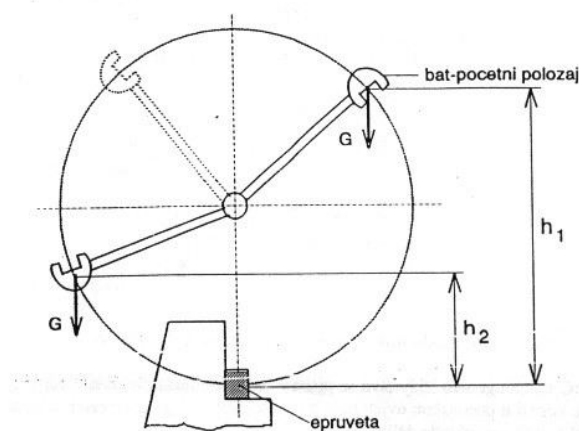
Dinamička izdržljivost, R_d (N/mm^2)

Dinamička izdržljivost se uobičajeno prikazuje preko Wöhlerovih (σ - N) krivulja koje daju odnos između broja ciklusa naprezanja do loma N i raspona nazivnog naprezanja $\Delta\sigma$. Raspon naprezanja $\Delta\sigma$ određuje se kao razlika najvećeg gornjeg naprezanja σ_{max} i najvećeg donjeg naprezanja σ_{min} . Najveće promjenjivo naprezanje koje uzorci izdrže bez pojave loma nakon praktički beskonačnog broja ciklusa, predloženo graničnim brojem ciklusa N_g , naziva se dinamička izdržljivost R_d .

Udarni rad loma, $KV(KU)$ (J)

Udarni rad loma određuje otpornost materijala krhkom lomu u uvjetima djelovanja udarnog opterećenja i to je mjera za žilavost materijala. Predstavljen je energijom utrošenom za lom ispitnog uzorka (Slika 5), a označava se sa KU ili KV ovisno o tome da li se kod ispitivanja koristi epruveta sa U ili V zarezmom. Najčešća metoda ispitivanja udarnog rada loma je pomoću Charpyjevog bata. Ispitivanje udarnog rada loma prema Charpyju mora se vršiti i pri niskim temperaturama. Propisane vrijednosti udarnog rada loma za čelike jesu sljedeće:

- 27 J pri temperaturi ispitivanja jednakoj ϑ_R za feritne čelike sa 1,5-5% Ni
- 40 J pri temperaturi ispitivanja od $-196^\circ C$ za čelike sa 9% Ni i zavarene materijale i odljevke od austenitnog čelika
- 40 J pri temperaturi ispitivanja jednakoj radnoj temperaturi ϑ_R za dupleks čelike



Slika 5 – Ispitivanje udarnog rada loma prema Charpyju

Lomna žilavost, K_{IC} ($N/m^{-3/2}$)

Mjera za lomnu žilavost je kritični intenzitet naprezanja na vrhu pukotine koji dovodi do njenog nestabilnog širenja. Od svih svojstava koji određuju žilavost, jedino lomna žilavost može poslužiti kao veličina za proračune. Ispituje se na ispitnom uzorku koji uz utor ima i umjetno izazvanu pukotinu, umaranjem dubine veće od 1,3 mm.

3.2. Zahtjevi na zavarljivost

Zavarljivost je sposobnost materijala da se pri određenim povoljnim uvjetima zavarivanja ostvari kontinuirani zavareni spoj koji će svojstvima udovoljiti predviđenim uvjetima i vijeku primjene. Osnovni parametar kojim se utvrđuje zavarljivost određenog materijala jest vrijednost ugljičnog ekvivalenta C_e za kojeg vrijedi formula:

$$C_e = \%Mn/4 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/10.$$

Zavarljivost je tim bolja što je niži udio ugljika i što je manji stupanj legiranosti, jer legiranost povisuje prokaljivost odnosno opasnost od spontanog zakaljivanja. Prihvatljiva vrijednost ugljičnog ekvivalenta je $C_e < 0,4$. Čelici s većim ugljičnim ekvivalentom zahtijevaju predgrijavanje, čime se postiže sporije ohlađivanje nakon zavarivanja.

Na zavarljivost utječu još i postupak zavarivanja, dimenzije dijelova koji se zavaruju, te ostale karakteristike materijala.

4. Čelici i čelični ljevovi za tlačnu opremu

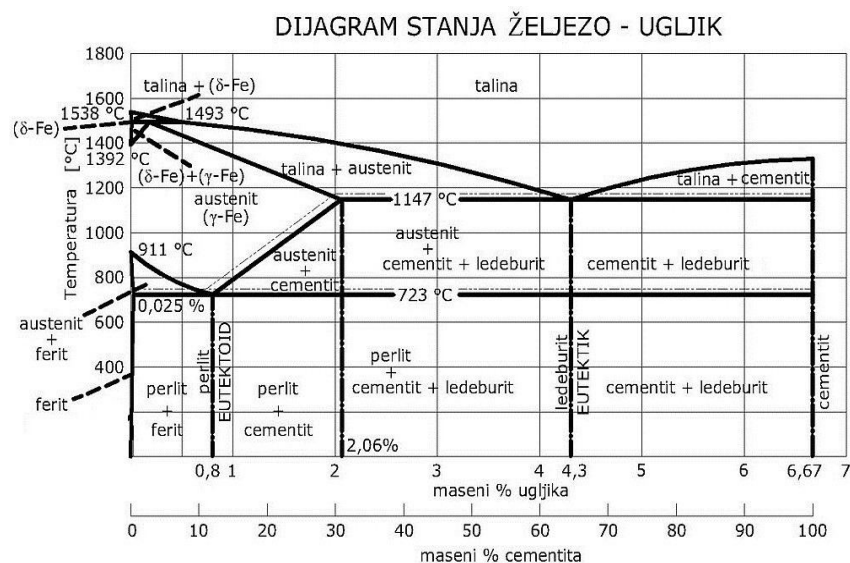
Osnovne skupine čelika i čeličnih ljevova za tlačnu opremu su:

- opći konstrukcijski čelici i čelični ljevovi,
- čelici povišene čvrstoće,
- visokočvrsti i ultračvrsti čelici,
- korozijski postojani (nehrđajući) čelici,
- čelici za povišene i visoke temperature,
- čelici za niske i snižene temperature.

4.1. Mikrostruktura čelika i utjecaj legirnih elemenata

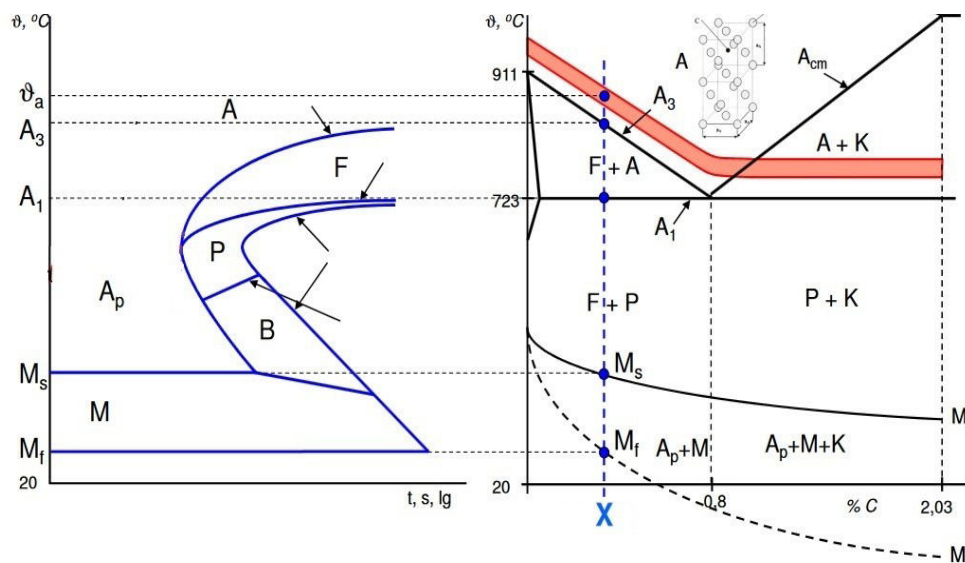
Osim kemijskog sastava i mehaničkih svojstava, bitan faktor kojim se karakteriziraju čelici za tlačnu opremu je njihova mikrostruktura. O mikrostrukтури ovise svojstva materijala, a određena je postupkom dobivanja legure, postupcima oblikovanja i toplinske obrade. Faktori koji određuju mikrostrukturu pojedinog materijala su: prisutne faze i konstituenti, veličina i usmjerenost kristalnog zrna, kemijska homogenost, deformacije strukture uslijed plastične deformacije materijala, raspodjela faza, prisutnost uključina i precipitata.

Za prikaz promjena koje se događaju u mikrostrukтури prilikom dobivanja čelika služi fazni Fe-C dijagram stanja, slika 6.



Slika 6 – Fe-C dijagram stanja za metastabilnu kristalizaciju

Metastabilni Fe-C dijagram prikazuje fazne promjene koje se događaju kod čelika sa određenim udjelom ugljika u ovisnosti o promjeni temperature uz uvjet da se ta određena Fe-C legura ohlađuje umjereno sporo. Osnovni Fe-C dijagram je binarni odnosno ima 2 elementa sustava, željezo i ugljik. U slučaju da u kemijskom sastavu legure postoje i legirni elementi, onda je Fe-C dijagram stanja pseudobinarni. Legirni elementi utječu na pomicanje karakterističnih linija koja odjeljuju pojedine segmente faznih pretvorbi.



Slika 7 – TTT dijagram za kontinuirano hlađenje (podeutektoidnog čelika s x% ugljika)

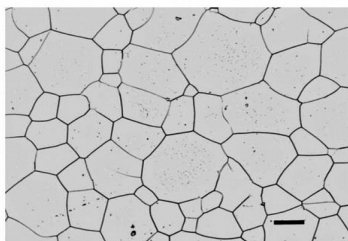
(F - ferit, P – perlit, B – bainit, M – martenzit, A – austenit, A_p – zaostali austenit)

Ako se čelik dodatno toplinski obrađuje brzina hlađenja je često veća od one po kojoj se fazne promjene u odvijaju metastabilno, pa se u tom slučaju za prikaz promjena koristi TTT (*eng. Time-temperature transformation*) dijagram, slika 7. TTT dijagram prikazuje fazne promjene u leguri u ovisnosti o brzini hlađenja.

Čelici za tlačnu opremu u pravilu imaju nizak postotak ugljika tako da kod njih nisu prisutne sve moguće faze i konstituenti koji se nalaze u Fe-C dijagramu. Stoga će ovdje biti spomenute samo faze koje su karakteristične za tu grupu materijala.

Ferit

Ferit je intersticijska čvrsta otopina ugljika u α -željezu sa prostorno centriranom kubičnom strukturom (BCC-rešetka).

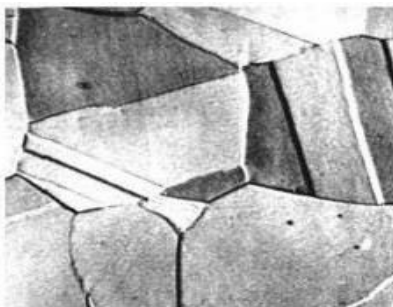


Slika 8 – Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika

Ferit je feromagnetičan i daje čeliku magnetska svojstva. Maksimalna topivost ugljika u α -željezu je 0,025% kod 723°C i samo $2 \cdot 10^{-7}\%$ na sobnoj temperaturi stoga se postizanje feritne strukture kod čelika sa većim postotkom ugljika postiže dodavanjem alfa-genih legiranih elemenata, odnosno elemenata koji stabiliziraju i promiču feritnu fazu. Od svih faza ferit je ujedno i najmekši sa vlačnom čvrstoćom od 280 Mpa i tvrdoćom od 80 HB. Zahvaljujući legiranim elementima i postupcima kojima se povećava čvrstoća (toplinska i deformacijska obrada) feritni čelici za tlačnu opremu mogu imati znatno višu vlačnu čvrstoću i bolja mehanička svojstva općenito. Na slici 8 prikazana je feritna mikrostruktura na primjeru jednog korozijski postojanog čelika.

Austenit

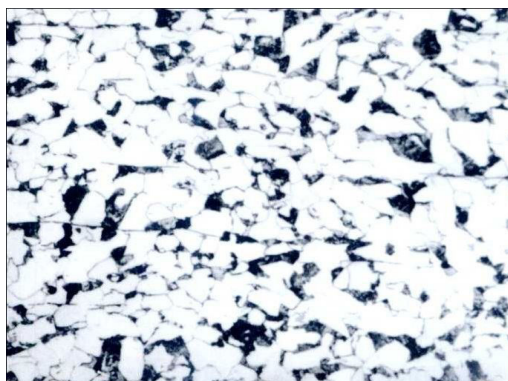
Austenit je intersticijska čvrsta otopina ugljika u γ -željezu sa plošno centriranom kubičnom strukturom (FCC-rešetka). Maksimalna topivost ugljika u austenitu je 2,06% kod 1147 °C. Kod nelegiranih čelika austenit nije stabilan na sobnoj temperaturi, no dodavanjem gamagenih legiranih elemenata stabilnost austenita se može postići i na niskim temperaturama. Slika 9 prikazuje austenitnu mikrostrukturu za neki čelik.



Slika 9 – Austenitna mikrostruktura kod čelika

Perlit

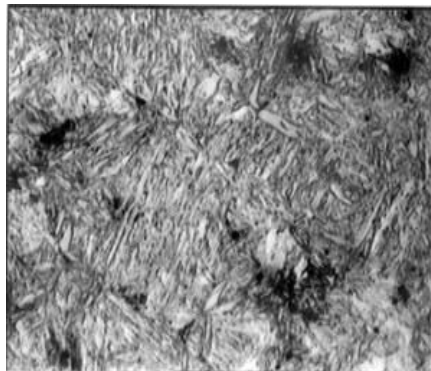
Perlit je dvofazna mješavina koja se sastoji od 88% ferita i 12% cementita. Lamelarna struktura perlita sastoji se od bijele feritne osnove ili matrice (koja čini većinu eutektoidne mješavine) i tankih pločica cementita. Vlačna čvrstoća perlita se kreće u rasponu od 700 do 900 N/mm², tvrdoća je oko 220 HV, a istezljivost oko 10%. Primjer feritno-perlitne mikrostrukture dan je na slici 10.



Slika 10 – Feritno-perlitna mikrostruktura (ferit-bijelo, perlit-crno)

Martenzit

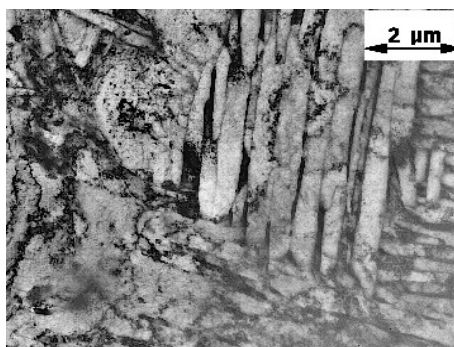
Martenzit nastaje iz austenita ukoliko se čelik sa temperature austenitizacije hladi gornjom kritičnom brzinom ili brže na dovoljno nisku temperaturu. Pretvorba se odvija bez prisutnosti difuzijskih procesa i time atomi ugljika ostaju zarobljeni u prostorno centriranoj tetragonalnoj kristalnoj rešetci željeza. Martenzit se javlja kod kaljenog čelika u obliku nakupina igličastih kristala koje se sijeku pod određenim kutovima (Slika 11). Martenzitni čelici nakon kaljenja imaju visoku čvrstoću i tvrdoću, ali su i vrlo krhki tako da se nakon kaljenja uvijek obavlja i toplinska obrada popuštanja čelika. Čelici za tlačnu opremu imaju nizak postotak ugljika tako da nakon procesa kaljenja često imaju dosta velike udjele zaostalog austenita. Zaostali austenit se može naknadno ukloniti dubokim hlađenjem.



Slika 11 – Čelik martenzitne mikrostrukture

Bainit

Bainit nastaje kada se čelik hladi brzinom između gornje i donje kritične brzine hlađenja na nižim temperaturama (između temperature stvaranja perlita i martenzita) čime se dobiva struktura sastavljena od ferita i cementita, ali različita od perlita. Zbog male brzine difuzije na ovoj temperaturi atomi ugljika se ne mogu pomicati na veće udaljenosti i stvoriti lamele cementita. Umjesto lamela ferita i cementita stvaraju se samo lamele ferita na čijim granicama se izdvaja cementit u obliku sitnih, kuglastih čestica. Raspon temperatura kod kojih nastaje bainit nalazi se između područja temperatura nastajanja perlita i martenzita, a izgled mikrostrukture bainita (slika 12) je sličan martenzitu. Bainitni čelici se rjeđe koriste kao materijal za tlačne spremnike.



Slika 12 – Čelik bainitne mikrostrukture

Utjecaj najbitnijih legirnih elemenata na svojstva čelika:**Krom (Cr)**

Krom je jak karbidotvorac i tvori karbide tvrđe od cementita, najčešće tipa $M_{23}C_6$ (M - Cr ili Cr+Fe+Mo) i puno rjeđe karbide tipa Cr_7C_3 , a sa dušikom može tvoriti nitride Cr_2N . Karbidi $Cr_{23}C_6$ se pri povišenim temperaturama (425 do 870°C) stvaraju i izlučuju po granicama zrna što može dovesti do pojave interkristalne korozije. Krom je alfa-gen element, odnosno legirni element koji promiče i stabilizira ferit. Ima veći afinitet prema kisiku od željeza i na površini čelika stvara zaštitni oksidni sloj, $(Fe,Cr)_2O_3$, koji štiti čelik od korozije. Okvirno, više od 12% Cr u čvrstoj otopini čelika uz monofaznu strukturu, daje čeliku potpunu korozijsku postojanost. Legiranje kromom utječe na sklonost krhkosti nakon popuštanja, što se izbjegava legiranjem s molibdenom. Kao supstitucijski atom ulazi u BCC ili FCC kristalnu rešetku željeza izazivajući očvrnuće materijala. U čeliku djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i toplinske rastezljivosti.

Nikal (Ni)

Nikal je jak gamageni element, odnosno promiče i stabilizira austenitnu fazu. Nije karbidotvorac, već se otapa u rešetki željeza. Ne promiče formiranje intermetalnih faza, ali utječe na kinetiku njihovog nastanka. Povišuje čvrstoću nehrđajućih čelika i povišuje žilavost i pri niskim temperaturama. Povišuje otpornost na opću koroziju feritnih čelika u medijima koji sadrže sumpornu kiselinu, ali kod čelika općenito smanjuje otpornost na napetosnu koroziju. Nikal se najviše koristi kao legirni element kod čelika posebnih svojstava: nehrđajućih i kemijski postojanih, čelika za povišene i niske temperature, vatrootpornih i nemagnetičnih čelika. Zbog visoke cijene legira se gotovo uvijek u kombinaciji s nekim drugim elementom.

Molibden (Mo)

Molibden je alfageni element, odnosno jak feritotvorac. Također je jak karbidotvorac koji tvori različite i kompleksne karbide tipa $M_{23}C_6$ koji precipitiraju sporim hlađenjem kroz austenitno područje. Utječe na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, kao i granice puzanja. Kod Cr-Ni i Mn-čelika dodaje se kako bi smanjio opasnost od pojave krhkosti nakon popuštanja i dodatno povišuje sekundarno otvrdnuće nakon popuštanja. Molibden odgađa okrupnjavanje karbidnih čestica pri zagrijavanju i povoljno djeluje na formiranje sitnozrnate mikrostrukture i na povećanje prokaljivosti. Poboljšava korozijsku postojanost i obradivost odvajanjem čestica. U pravilu se kombinira sa drugim legirnim elementima.

Vanadij (V)

Vanadij je alfageni element koji otopljen u metalnoj osnovi promiče i stabilizira feritnu strukturu. Također je jak karbidotvorac koji tvori fino dispergirane karbide i karbonitride i na taj način povišuje tvrdoću i otpornost na trošenje pri normalnim i povišenim temperaturama. Ima važnu ulogu u sprečavanju rasta zrna tijekom toplinske obrade (efikasno djeluje već 0,1% V). Povišuje granicu razvlačenja, pa se stoga koristi kao legirni element kod čelika za opruge. Zbog skupoće u pravilu se koristi u kombinaciji sa drugim legirnim elementima.

Mangan (Mn)

Gotovo svi čelici sadrže mangan. Mangan je gamageni legirni element i stabilizira austenitnu fazu osobito na nižoj temperaturi, sprečavajući transformaciju austenita u martenzit. Djeluje dezoksidirajuće, a na sebe veže i sumpor čime sprečava stvaranje željeznog sulfida koji loše utječe na svojstva čelika. Povišuje granicu razvlačenja kod konstrukcijskih čelika, povoljno djeluje na žilavost i znatno poboljšava prokaljivost čelika. Na višim temperaturama njegovo djelovanje ovisi o udjelu drugih legirnih elemenata. Čelici legirani s manganom skloni su pregrijavanju (brzom porastu zrna pri visokim temperaturama) i krhkosti nakon popuštanja. Mangan se ponekad dodaje specijalnim legurama da poboljša topivost dušika u austenitnoj fazi.

4.2. Klasifikacija čelika za tlačnu opremu prema normi EN 13445-2

Čelici su po normi klasificirani na osnovu vrijednosti granice razvlačenja, mikrostrukture i udjela legiranih elemenata. Radi se o sljedećim grupama čelika:

Grupa 1

Čelici sa minimalnom granicom razvlačenja $R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$ i propisanim kemijskim sastavom sa udjelima pojedinih elemenata u %: $C \leq 0,25$, $Si \leq 0,6$, $Mn \leq 1,7$, $Mo \leq 0,7$, $S \leq 0,045$, $P \leq 0,045$, $Cu \leq 0,4$, $Ni \leq 0,5$, $Cr \leq 0,3$, $Nb \leq 0,05$, $V \leq 0,12$, $Ti \leq 0,05$.

Podgrupe

1.1 Čelici sa minimalnom granicom razvlačenja $R_{eH} \leq 275 \text{ N/mm}^2$

1.2 Čelici sa granicom razvlačenja $275 < R_{eH} < 360 \text{ N/mm}^2$

1.3 Normalizirani sitnozrnati čelici sa granicom razvlačenja $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$

1.4 Čelici sa poboljšanom otpornošću na atmosfersku koroziju (mogu imati više udjele pojedinih legiranih elemenata od onih specificiranih za grupu općenito)

Grupa 2

Termomehanički obrađeni sitnozrnati čelici i čelični ljevovi sa granicom razvlačenja $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$

Podgrupe

2.1 Čelici i čelični ljevovi sa granicom razvlačenja $360 < R_{eH} < 460 \text{ N/mm}^2$

2.2 Čelici i čelični ljevovi sa granicom razvlačenja $R_{eH} > 460 \text{ N/mm}^2$

Grupa 3

Čelici za poboljšavanje i precipitacijski očvršnuti čelici osim nehrđajućih sa granicom razvlačenja $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$.

Podgrupe

3.1 Čelici za poboljšavanje sa granicom razvlačenja $360 < R_{eH} < 690 \text{ N/mm}^2$

3.2 Čelici za poboljšavanje sa granicom razvlačenja $R_{eH} > 690 \text{ N/mm}^2$

3.3 Precipitacijski očvršnuti čelici (osim nehrđajućih)

Grupa 4

Cr – Mo – (Ni) čelici niskolegirani vanadijem s masenim udjelom $Mo \leq 0,7\%$ i $V \leq 0,1\%$.

Podgrupe

4.1 Čelici s udjelom $Cr \leq 0,3\%$ i $Ni \leq 0,7\%$

4.2 Čelici s udjelom $Cr \leq 0,7\%$ i $Ni \leq 1,5\%$

Grupa 5

Cr – Mo čelici bez vanadija s masenim udjelom $C \leq 0,35\%$.

Podgrupe

5.1 Čelici s udjelom $0,75 \leq Cr \leq 1,5\%$ i $Mo \leq 0,7\%$

5.2 Čelici s udjelom $1,5 \leq Cr \leq 3,5\%$ i $0,7 \leq Mo \leq 1,2\%$

5.3 Čelici s udjelom $3,5 \leq Cr \leq 7\%$ i $0,4 \leq Mo \leq 0,7\%$

5.4 Čelici s udjelom $7 \leq Cr \leq 10\%$ i $0,7 \leq Mo \leq 1,2\%$

Grupa 6

Cr – Mo – (Ni) čelici visokolegirani vanadijem.

Podgrupe

6.1 Čelici s udjelom $0,3 \leq Cr \leq 0,75\%$, $Mo \leq 0,7$ i $V \leq 0,35\%$

6.2 Čelici s udjelom $0,75 \leq \text{Cr} \leq 3,5\%$, $0,7 \leq \text{Mo} \leq 1,2\%$ i $\text{V} \leq 0,35\%$

6.3 Čelici s udjelom $3,5 \leq \text{Cr} \leq 7\%$, $\text{Mo} \leq 0,7\%$ i $0,45 \leq \text{V} \leq 0,55\%$

6.4 Čelici s udjelom $7 \leq \text{Cr} \leq 12,5\%$, $0,7 \leq \text{Mo} \leq 1,2\%$ i $\text{V} \leq 0,35\%$

Grupa 7

Feritni, martenzitni ili precipitacijski očvršnuti čelici sastava $\text{C} \leq 0,35\%$ i $10,5 \leq \text{Cr} \leq 30\%$

Podgrupe

7.1 Feritni nehrđajući čelici

7.2 Martenzitni nehrđajući čelici

7.3 Precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici

Grupa 8

Austenitni nehrđajući čelici.

Podgrupe

8.1 Austenitni nehrđajući čelici s udjelom $\text{Cr} \leq 19\%$

8.2 Austenitni nehrđajući čelici s udjelom $\text{Cr} > 19\%$

8.3 Austenitni nehrđajući čelici s udjelom $4 \leq \text{Mn} \leq 12\%$

Grupa 9

Niklom legirani čelici s masenim udjelom $\text{Ni} \leq 10\%$.

Podgrupe

9.1 Niklom legirani čelici s udjelom $\text{Ni} \leq 3\%$

9.2 Niklom legirani čelici s udjelom $3 \leq \text{Ni} \leq 8\%$

9.3 Niklom legirani čelici s udjelom $8 \leq \text{Ni} \leq 10\%$

Grupa 10

Dupleks nehrđajući čelici.

Podgrupe

10.1 Dupleks nehrđajući čelici sa udjelom $\text{Cr} \leq 24\%$

10.2 Dupleks nehrđajući čelici sa udjelom $\text{Cr} > 24\%$

4.3. Opći konstrukcijski čelici i čelični lijevovi

Ova skupina čelika ima zajamčena mehanička svojstva, ali ne i kemijski sastav. To su nelegirani čelici sa niskim udjelom ugljika, a neki od njih imaju i propisani sastav nečistoća (udio P i S mora biti niži od 0,045%). Zbog niskog udjela ugljika i legiranih elemenata niska je i vrijednost ugljičnog ekvivalenta C_e što znači da je ova skupina čelika dobro zavarljiva. Mikrostruktura ovih čelika je feritno-perlitna, a sitnozrnatost se postiže normalizacijom nakon toplog oblikovanja. Svojstva ovih čelika su: dobra nosivost i sigurnost (R_e , R_m , KU/KV), povoljan omjer granice razvlačenja i vlačne čvrstoće (R_e/R_m), relativno velika istezljivost (A) i velika površina ispod krivulje u F- ΔL dijagramu (sigurnost od krhkog loma).

Vrijednosti mehaničkih svojstava za cijelu skupinu čelika kreću se u rasponima:

$$R_e = 190 - 370 \text{ N/mm}^2,$$

$$R_m = 330 - 700 \text{ N/mm}^2,$$

$$A = 10 - 28 \text{ \%}.$$

Vrijednosti R_e ovise o dimenzijama (debljina), a tim su više što je viši udio ugljika i viši udio perlita u mikrostrukturi. Viša se čvrstoća postiže dodatkom Mn i Si te ostalih elemenata (Mn ne smije

prijeći 1,65% jer povisuje prokaljivost). Što je viši omjer Mn/C, to je veća žilavost i to posebno pri nižim temperaturama (manja sklonost krhkom lomu). Viši maseni udio Mn povisuje prokaljivost i opasnost od spontanog zakaljivanja pri zavarivanju. Temperature uporabe su od -40 do +50°C (normalne i nešto snižene). Pri sniženim temperaturama povećana je opasnost od pojave krhkog loma.

Podskupine zavarljivih čelika za nosive konstrukcije imaju oznake (0, A, B, C i D). Za izradu tlačnih spremnika koriste se skupine A, B, C i D.

U skupinu A spadaju čelici: S235JRG1 i S275JRG2, a u skupinu B (zajamčen udarni rad loma pri 20 °C): S235JRG2, S275JRG2 i S355JRG2. Primjenjuju se za tlačno i savojno opterećene konstrukcije gdje nema opasnosti od pojave krhkog loma. Od ovih materijala se izrađuju ekspanzijske posude.

U skupinu C spadaju posebno smireni čelici sa zajamčenim udarnim radom loma pri 0 °C (čelici S235J0G3, S275J0G3, S355J0G3), a skupina D sadrži posebno smirene i normalizirane čelike sa zajamčenom vrijednosti udarnog rada loma od 27 J pri -20 °C, pa su čelici otporni na krhki lom (čelici S235J2G3, S275J2G3, S355J2G3). Obje skupine se koriste općenito za izradu statički i dinamički opterećenih zavarenih konstrukcija, a skupina D i pri nižim temperaturama.

4.4. Čelici povišene čvrstoće

Čelici iz ove skupine nemaju zajamčen kemijski sastav već samo mehanička svojstva. Podaci o kemijskom sastavu daju samo maksimalne vrijednosti pojedinih elemenata, među kojima je najvažniji udio nečistoća (P i S).

Cilj razvoja ovih čelika je postignuće više granice razvlačenja i više vlačne čvrstoće, a time i višeg dopuštenog naprezanja u radu. Primjenom ovih čelika smanjuju se nosivi presjeci kod jednakih opterećenja, odnosno smanjuje se masa i volumen konstrukcije, što dovodi do sniženja ukupnih troškova materijala. Nadalje u razvoju čelika povišene čvrstoće nastojao se zadržati povoljan omjer R_{ℓ}/R_m (plastična rezerva), tako da u slučaju preopterećenja prije dolazi do plastične deformacije, a ne do iznenadnog loma. Dobra zavarljivost ovih čelika postignuta je zadržavanjem što nižeg udjela ugljika.

Povišenje čvrstoće čelika ponajprije ovisi o mogućnostima modificiranja njegove mikrostrukture. Tako se čelici s jednofaznom mikrostrukturom ferita ili austenita ne mogu očvrstnuti kaljenjem, ali su zato očvrstljivi precipitacijom (uz dodatak odgovarajućih legiranih elemenata). Svi načini povišenja čvrstoće temelje se na otežanom kretanju dislokacija nastajanjem prepreka što kao posljedicu obično ima povišenje granice razvlačenja dok vlačna čvrstoća ne mora nužno rasti.

Osnovni mehanizmi očvrstnuća kod ovih čelika su:

Očvrstnuće kristalima mješancima

Zapreke gibanju dislokacija su otopljeni strani atomi u rešetki željeza koji čine intersticijske ili supstitucijske kristale mješance. Na porast čvrstoće najjače djeluje povišenje masenog udjela ugljika u čeliku, a povoljno djeluje i dušik. Ovaj način očvrstnuća od svih daje najmanje efekte.

Očvrstnuće matenzitnom transformacijom

Kod postupka kaljenja dolazi do transformacije austenita u martenzit, čime se povisuje tvrdoća i čvrstoća, ali pada istezljivost i žilavost. Zbog toga se nakon kaljenja obavezno provodi popuštanje.

Očvrstnuće hladnom deformacijom

Uslijed postupaka hladnog deformiranja dolazi do umnažanja dislokacija čime raste njihova gustoća. Posljedica je porast granice razvlačenja i znatno smanjenje žilavosti.

Očvrsnuće usitnjenjem zrna

Zapreke gibanju dislokacija čine čine velikokutne granice zrna, a povoljnije je da zrna budu što sitnija. Usitnjenjem zrna dolazi i do povećanja žilavosti.

Očvrsnuće precipitacijom i disperzijom faza

Radi se o izdvojenim fazama nelegiranih ili legiranih karbida ili ostalih intermetalnih spojeva i prijelaznih faza koje se izlučuju iz homogene mikrostrukture ferita, austenita ili martenzita. Ove faze nastaju kada se prekorači granica topivosti stranih atoma u rešetki željeza. Djelovanje tih faza ogleda se kroz njihovu raspodjelu i vrstu – koherentne ili nekoherentne, srednji promjer i njihov međusobni razmak. Koherentne faze mogu presjecati klizne ravnine za što se troši energija pri djelovanju vanjskog opterećenja. Druga je mogućnost da dislokacije zaobilaze faze za što opet treba energija koja bi se inače utrošila u deformaciju.

Osnove podskupine čelika povišene čvrstoće su:

- Sitnozrnati normalizirani mikrolegirani čelici (HSLA): $360 < R_{p0,2} < 500 \text{ N/mm}^2$,
- Sitnozrnati poboljšani čelici: $R_{p0,2} \geq 500 \text{ N/mm}^2$.

Koriste se kod normalnih, povišenih i sniženih temperatura.

4.4.1. Sitnozrnati normalizirani mikrolegirani čelici (HSLA)

Ova skupina čelika nastala je razvojem čelika S355J0G3 i S355J2G3 koji su posebno smireni aluminijem i silicijem i imaju sitniju feritno-perlitnu mikrostrukturu i dovoljnu zavarljivost.

Udio ugljika kod ovih čelika je maksimalno do 0,2% radi zavarljivosti. Svi ovi čelici imaju do 1,7% mangana, ali ne iznad te granice jer to bitno utječe na pogoršavanje zavarljivosti. Mangan, nikal i krom povisuju čvrstoću preko očvrnuća kristalima mješancima. Time se formiraju tvrde mikrostrukturne faze, pomiče temperatura pretvorbe austenita ka nižim temperaturama i smanjuje gornja kritična brzina hlađenja. Negativna posljedica navedenog načina povišenja čvrstoće je rast sklonosti zakaljivanju pri zavarivanju.

Svi ovi čelici sadrže oko 0,025% aluminija koji utječe na sitnozrnatost. Uz aluminij, dodavanjem malih količina pojedinih disperzoidnih elemenata u udjelu manjem od 0,1% (Nb, V, Ti) stvaraju se fino raspoređeni nitridi (AlN, VN, TiN), karbidi (VC, NbC) i karbonitridi (VCN) koji koče porast austenitnog zrna. Dodaci navedenih elemenata snižuju završnu temperaturu valjanja čime se otežava rekristalizacija austenita te se takav sitnozrnat pretvara u sitnu feritno-perlitnu strukturu.

Povišenje vrijednosti granice razvlačenja ostvareno je otežavanjem gibanja dislokacija stvaranjem prepreka u mikrostrukтури materijala (granice zrna i fino raspršene sitne čestice). Posljedica sitnog austenitnog zrna je, između ostalog, povećana sklonost pretvorbi u perlitnom stupnju, pa je otežano stvaranje martenzita i poboljšana zavarljivost.

Sitnozrnati mikrolegirani čelici nisu osjetljivi na krhki lom i imaju nisku prijelaznu temperaturu. Tablice 1 i 2 sadrže kemijski sastav i mehanička svojstva za odabrane čelike ove skupine.

Tablica 1 – Sitnozrnati normalizirani mikrolegirani čelici (HSLA) – kemijski sastav

Oznaka čelika	Maseni maksimalni udio pojedinih elemenata, %															
	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V	N	Nb	Ti	Al	Cu	Zr	B
P275NL1	0,16	0,4	1,5	0,5	0,025	0,015	0,3	0,08	0,05	0,012	0,05	0,03	0,02	0,3	-	-
P285NH	0,18	0,4	1,4	0,3	0,025	0,015	0,3	0,08	0,05	0,02	0,03	-	0,06	0,2	-	-
P355NH	0,18	0,5	1,7	0,8	0,025	0,015	0,3	0,08	0,1	0,012	0,05	0,03	0,02	0,3	-	-
P355NL1	0,18	0,5	1,7	0,8	0,025	0,015	0,3	0,08	0,1	0,012	0,05	0,03	0,02	0,3	-	-
P460NH	0,2	0,6	1,7	0,8	0,025	0,015	0,3	0,1	0,2	0,025	0,05	0,03	0,02	0,7	-	-
P460NL1	0,2	0,6	1,7	0,8	0,025	0,015	0,3	0,1	0,2	0,025	0,05	0,03	0,02	0,7	-	-

Tablica 2 – Sitnozrnati normalizirani mikrolegirani čelici (HSLA) - mehanička svojstva

Mehanička svojstva nakon normalizacije, debljina stijenke < 60mm					
Oznaka čelika	R _m , N/mm ²	R _e , N/mm ²	KV pri 0°C, J	A (%)	Grupa čelika po CR ISO 15608
P275NL1	390-510	275	43-50	24	1.1
P285NH	370-510	285	34	21-23	1.1
P355NH	490-630	355	35-40	22	1.2
P355NL1	490-630	355	43-50	22	1.2
P460NH	570-720	460	35-40	16-19	1.3
P460NL1	570-720	460	43-50	17-19	1.3

Ovi čelici se primjenjuju za izradu kuglastih i cilindričnih spremnika ukapljenih plinova, te za izradu cijevi za visokotlačne cjevovode (slika 13).



Slika 13 – Tlačni spremnik za transport tekućih plinova

4.4.2. Sitnozrnati poboljšani čelici

Ova skupina čelika razvijena je u 3-oj etapi razvoja nelegiranih čelika za nosive konstrukcije. Čelici su kaljeni u vodi s temperature oblikovanja i popušteni u čeličani pri 680-710 °C i u takvom stanju se isporučuju. Čelici za poboljšavanje imaju u pravilu više od 0,3% ugljika, no u ovoj skupini čelika udio ugljika ne prelazi 0,2% kako bi se zadržala dobra zavarljivost. Niskougljični martenzit je inače najpogodnija mikrostruktura za postizanje izvanrednih svojstava čvrstoće i žilavosti. U odnosu na feritno-perlitnu i homogenu bainitnu mikrostrukturu naročito je povećana otpornost na krhki lom. Karakteristika kemijskog sastava ovih čelika je višestruko legiranje jer se sa više legiranih elemenata koji zbirno imaju manji udio mogu postići bolji efekti na svojstva, nego legiranjem sa samo jednim ili dva elementa sa velikim udjelom. Udjeli legiranih dodataka (Cr, Ni, Mo, B) su određeni tako da se omogući zakaljivost hlađenjem na zraku (kod zavarivanja), a da se izbjegne stvaranje ferita. Cilj je postići mikrostrukturu niskougljičnog martenzita ili donjeg bainita kako bi pri zavarivanju svojstva zavara bila što bliža svojstvima osnovnog materijala. Mikrolegiranjem se povisuje M_s temperatura (oko 400 °C) tako da pri hlađenju dolazi do poboljšavanja samopopuštanjem martenzita u površinskim slojevima toplotom jezgre, čime je poboljšana žilavost čelika. Sitnozrnatost je kod ovih čelika osigurana i disperzoidnim elementima (V, Zr, Ti, B). Otpornost na popuštanje mora biti što viša kako bi se izbjegao pad tvrdoće u ZUT-u pri zavarivanju. Isto tako pri zavarivanju treba izbjegavati stvaranje igličastog martenzita i poligonalnog ferita. U tablicama 3 i 4 navedeni su kemijski sastav i mehanička svojstva za neke sitnozrnate poboljšane čelike.

Tablica 3 – Sitnozrnati poboljšani čelici - kemijski sastav

Oznaka čelika	Maseni maksimalni udio pojedinih elemenata, %															
	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V	N	Nb	Ti	Al	Cu	Zr	B
P460Q	0,18	0,5	1,7	1	0,025	0,01	0,5	0,5	0,08	0,015	0,05	0,03	0,3	-	0,05	0,005
P460QL1	0,18	0,5	1,7	1	0,02	0,008	0,5	0,5	0,08	0,015	0,05	0,03	-	0,3	0,05	0,005
P500Q	0,18	0,6	1,7	1,5	0,025	0,01	1	0,7	0,08	0,015	0,05	0,05	-	0,3	0,15	0,005
P500QL2	0,18	0,6	1,7	1,5	0,02	0,008	1	0,7	0,08	0,015	0,05	0,05	-	0,3	0,15	0,005
P620Q	0,2	0,6	1,7	0,8	0,025	0,02	0,3	0,1	0,2	0,02	0,05	0,04	0,02	-	-	-
P690QH	0,2	0,8	1,7	2,5	0,025	0,01	1,5	0,7	0,12	0,015	0,06	0,05	-	0,3	0,15	0,005
P690QL1	0,2	0,8	1,7	2,5	0,02	0,008	1,5	0,7	0,12	0,015	0,06	0,05	-	0,3	0,15	0,005

Tablica 4 – Sitnozrnati poboljšani čelici - mehanička svojstva

Mehanička svojstva nakon kaljenja i popuštanja, debljina stijenke < 100mm					
Oznaka čelika	R_m , N/mm ²	R_e , N/mm ²	KV pri 0°C, J	A (%)	Grupa čelika po CR ISO 15608
P460Q	550-720	460	40	19	3.1
P460QL1	550-720	460	60	19	3.1
P500Q	590-770	500	40	17	3.1
P500QL2	590-770	500	80	17	3.1
P620Q	740-930	620	31	14	3.1
P690QH	770-940	690	31-40	14-16	3.1
P690QL1	770-940	690	39-60	14-16	3.1

Ovi čelici se primjenjuju kod izrade kuglastih tlačnih spremnika za plinove (slika 14).



Slika 14 – Kuglasti tlačni spremnik za plinove

4.5. Visokočvrsti i ultračvrsti čelici

Kombinacijom različitih načina očvršnuća – usitnjenjem zrna, matenzitnom transformacijom, precipitacijom (dozrijevanjem) povezano s deformacijom austenita, mogu se postići najviše vrijednosti granice razvlačenja ($R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$) i čvrstoće od svih polikristaliničnih materijala. Glavna zadaća razvoja ultračvrstih čelika nije samo postizanje visokih vrijednosti R_m i $R_{p0,2}$ nego (ovisno o primjeni) istodobno postizanje i sljedećih svojstava:

- visoke žilavosti i niske prelazne temperature
- visoke dinamičke izdržljivosti i niske urezne osjetljivosti
- otpornost na koroziju
- čvrstoće pri povišenim i visokim radnim temperaturama
- potpune prokaljivosti (minimalno 95% martenzita u jezgri)
- lake obradljivosti odvajanjem čestica
- što jednostavnije toplinske obrade
- zadovoljavajuće zavarljivosti

Čelici iz ove skupine se na osnovu vrijednosti $R_{p0,2}$ mogu podijeliti na:

- čelike visoke čvrstoće: $R_{p0,2} = 750 - 1500 \text{ N/mm}^2$
- ultračvrste čelike: $R_{p0,2} > 1500 \text{ N/mm}^2$.

Ultračvrsti čelici se dalje mogu svrstati u sljedeće skupine:

- čelici za poboljšavanje:
 - niskolegirani nisko popušteni
 - visokolegirani visokopopušteni
- termomehanički obrađeni čelici
- korozijski postojani precipitacijski očvršnuti čelici (martenzitni, poluaustenitni, austenitni)
- maraging čelici

Mehanizmi očvršnuća kod ultračvrstih čelika su: očvršnuće kristalima mješancima (Ni i/ili Mo), transformacijsko očvršnuće (kaljenje), očvršnuće precipitacijom (u osnovnoj masi austenita ili martenzita), očvršnuće usitnjenjem zrna (disperzivnim elementima: V, Ti, Zr, B)

4.5.1. Niskolegirani niskopopušteni čelici

Čelici ove grupe imaju udio ugljika 0,3 – 0,45%, a legiraju se sa Si, Mn, Cr, Ni, Mo, V u raznim kombinacijama udjela pojedinih legiranih elemenata. Silicij pomiče niskotemperaturnu krhkost popuštanja (krhkost 260 °C) u područje viših temperatura (oko 400 °C), pa tako omogućuje srednje popuštanje, a uz to djeluje neposredno i na povišenje granice razvlačenja (kao kod opružnih čelika). Ako u čeliku nema silicija zbog žilavosti mora biti nikla uz kombinaciju udjela Cr-Mo-V. Toplinska obrada ovih čelika sastoji se od kaljenja (gašenje u vodi ili ulju) i popuštanja niskog do srednjeg (250 – 350 °C). Povoljna mehanička svojstva mogu se postići i izotermičkim poboljšavanjem pri 250 – 350 °C na bainitnu mikrostrukturu. Visoka čistoća čelika potrebna je zbog postizanja dovoljne lomne žilavosti i dinamičke izdržljivosti. Vrijednosti granice razvlačenja kreću se u rasponu 1500 – 1800 N/mm², a vrijednosti istežljivosti između 6 – 13%. Nedostaci ovih čelika su: korozijska nepostojanost, vodikova krhkost pri galvanskom prevlačenju i zavarivanju, nepostojanost u metalnim tvorevinama i sklonost anizotropiji. Karakteristike nekih čelika ove skupine navedene su u tablici 5.

Tablica 5 – Niskolegirani niskopopušteni čelici - mehanička svojstva i kemijski sastav

Oznaka čelika	Kem. Sastav, %	Toplinska obrada			Mehanička svojstva			
		ϑ_A , °C	gašenje	ϑ_P , °C	R_m , N/mm ² sred.	$R_{p0,2}$, N/mm ² min.	A_5 , % min.	KU_{DVM} , J min.
41SiNiCrMoV7-5	0,41 C, 0,8 Cr, 0,4 Mo, 0,1 V,...	890-910	ulje	300	1800	1600	6	27
36NiCrMoV7-3	0,36 C, 0,35 Mo, 0,1 V,...	850-870	ulje	200	1800	1500	6	30
30CrMoV9	0,3 C, 0,25 Mo, 0,15 V,...	850-870	ulje, voda	230	1980	1640	10	35
30NiCrMnSi6-4	0,3 C, 1,15 Mn, 1,05 Si,...	900	ulje	250	1850	1600	13	60

4.5.2. Visokolegirani viskopopušteni čelici

Približni kemijski sastav ovih čelika je: 0,4% C, oko 1% Si, oko 5% Cr, 1,3 – 2% Mo, 0,4 – 1% V, a uz to sadrže i male količine Mo, Nb i W. Ukupan udio legiranih elemenata prelazi 5% i zato ova skupina spada u visokolegirane čelike. Legirni elementi imaju zadaću stvaranja karbida. Toplinska obrada ovih čelika sastoji se od kaljenja i visokog popuštanja. Popuštanjem pri temperaturama 500 – 550 °C dolazi do raspada zaostalog austenita i izlučivanja karbida popuštanja tipa Cr₇C₃, Mo₂C, VC i V₄C₃, čija je posljedica povišenje tvrdoće u odnosu na tvrdoću nakon kaljenja (tzv. "sekundarno otvrdnuće"). Kod ovih čelika postiže se potpuna prokaljenost i za velike dimenzije (promjeri i do 300 mm). Postizive vrijednosti vlačne čvrstoće su i do 2000 N/mm², a do tih vrijednosti dinamička izdržljivost ostaje u omjeru $R_d \approx 0,5 \cdot R_m$.

Ovi čelici (tablica 6) su poznati kao alatni čelici za topli rad, ali se primjenjuju i kod izrade tlačnih spremnika.

Tablica 6 – Visokolegirani visokopopušteni čelici - mehanička svojstva i kemijski sastav

Oznaka čelika	Kem. Sastav, %	Toplinska obrada			Mehanička svojstva			
		ϑ_A , °C	gašenje	ϑ_P , °C	R_m , N/mm ² max.	$R_{p0,2}$, N/mm ² max.	A_5 , % min.	KU_{DVM} , J min
X41CrMoV5-1	0,41 C, 0,4 V, 0,12 Nb..	1020-1050	ulje, zrak, topla kupka	550-650	1900	1600	6-8	24-34
X40CrMoV5-1	0,40 C, 0,1 V,...	1020-1060	ulje, zrak, topla kupka	550-650	1960	1650	6-8	24-34

4.5.3. Termomehanički obrađeni čelici

Kod ove grupe čelika visoka granica razvlačenja, čvrstoća i visoka sigurnost od krhkog loma uz relativno dobru duktilnost, postignuta je kombinacijama postupaka oblikovanja deformiranjem i toplinske obrade kaljenja i izotermičkog poboljšavanja.

Deformiranje se odvija ili prije ili za vrijeme transformacije mikrostrukture (termomehanička obrada), ili nakon faznih pretvorbi (mehanotermička obrada). Mehanizmi očvrnuća kod termomehaničke obrade kaljivih čelika su: povišenje gustoće dislokacija pri oblikovanju austenita i pri njegovoj pretvorbi u martenzit, promjena sastava i morfologije martenzita, stvaranje razgranate mreže granica podzrna u toplo deformiranom austenitu i stvaranje sitnih jednolično raspoređenih karbida tijekom popuštanja.

Termomehaničke i mehanotermičke metode obrade koje se danas primjenjuju jesu sljedeće:

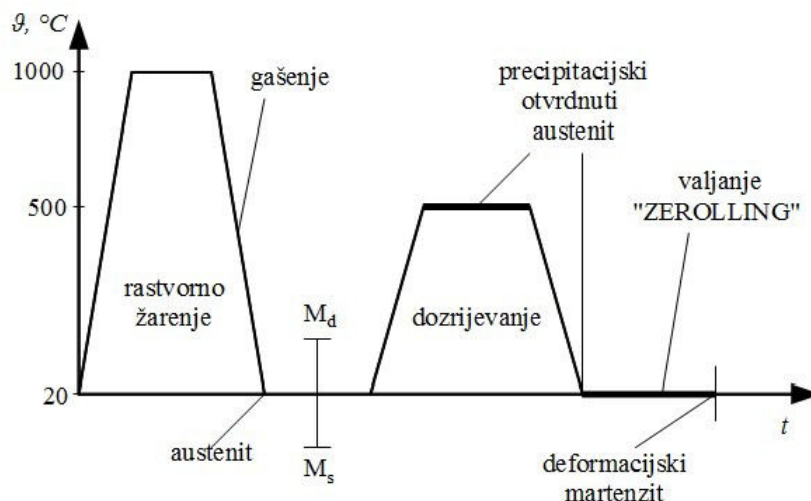
- "Ausforming" postupak,
- TRIP (*Transformation Induced Plasticity*) postupak,
- "Perlifforming" postupak,
- "Isoforming" postupak,
- "Marforming" postupak.

Ausforming postupak

Ausforming je postupak termomehaničke obrade koji se sastoji od oblikovanja metastabilnog austenita plastičnim deformiranjem pri konstantnoj temperaturi. Za postupak su posebno prikladni visokolegirani čelici odvojenih područja perlita i bainita – čelici sa što većim područjem tromosti metastabilnog austenita na pretvorbu (obično između 350 i 600°C). Deformacija austenita mora se odvijati ispod temperature rekristalizacije. Uzrok povišenja čvrstoće je velika gustoća dislokacija nastalih deformacijom koje ostaju i nakon pretvorbe u martenzit. Temperatura oblikovanja i brzina deformacije ne utječu na očvrnuće. Jedini utjecajni faktor je stupanj deformacije. Ovim postupkom povišuje se granica razvlačenja za oko 30%, a da se pritom ne pogoršava duktilnost. Također se povišuje dinamička izdržljivost i postiže se visoka lomna žilavost. Nedostatak je povišena anizotropnost strukture i svojstava.

Postupak TRIP

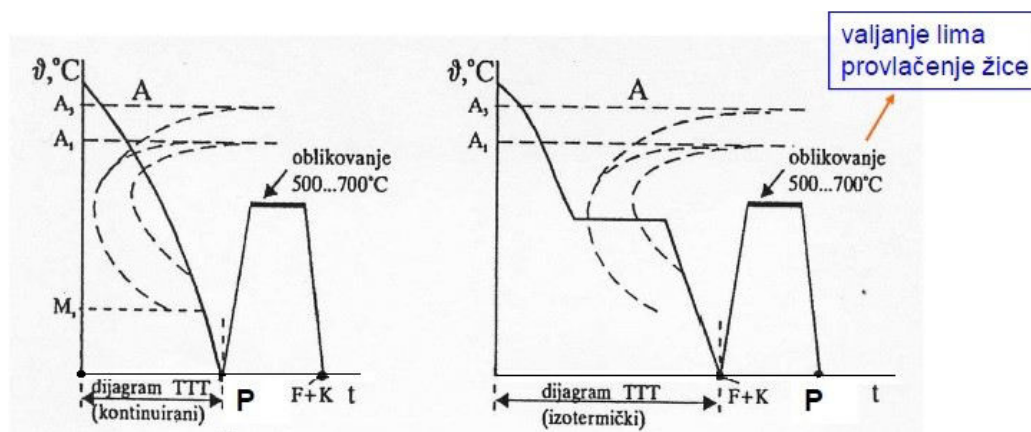
Postupak je sličan ausformingu, a primjenjuje se za austenitne čelike precizno reguliranog sastava (tzv. TRIP čelici) kod kojih je moguća pretvorba prethodno precipitacijski otvrdnutog austenita u deformacijski inducirani martenzit valjanjem pri okolišnoj temperaturi (tzv. "zerolling" valjanje), slika 15.



Slika 15 – Dijagram postupka TRIP

Perliforming postupak

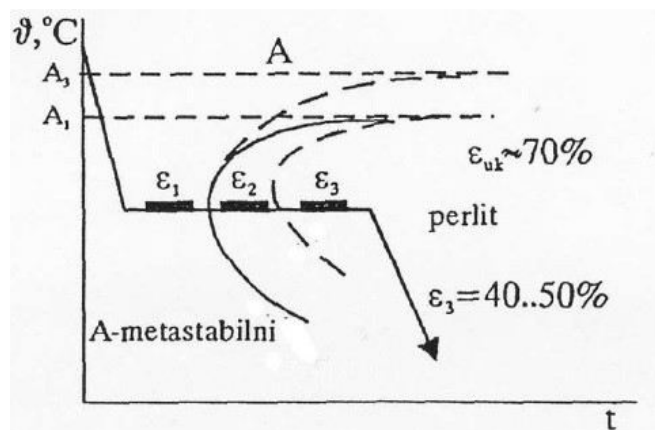
Riječ je o mehanotermičkoj obradi jer se deformacija perlita odvija nakon kontinuirane ili izotermičke pretvorbe iz austenita. Postupak se provodi u području perlita, a do očvrnuća dolazi deformiranjem u temperaturnom rasponu 500 – 700 $^\circ\text{C}$ (slika 16). Strukturu perlita oblikovanog na tim temperaturama karakterizira nestanak lamela cementita (prelaze u globule) te nastanak sitne poligonalne podstrukture ferita u zrnima reda veličine 1 μm . Postupak je primjenjiv za nelegirane i niskolegirane podeutektoidne i eutektoidne čelike. Perliforming utječe na prelaznu temperaturu čelika i osigurava višu $R_{p0,2}$ od obične toplinske obrade, uz zadovoljavajuću istezljivost A.



Slika 16 – Dijagram perliforming postupka - kontinuirani i izotermički

Isoforming postupak

Kod ovog postupka deformiranje se odvija pri izotermi (između 500 i 700 $^\circ\text{C}$) prije i za vrijeme fazne pretvorbe austenita u perlit (slika 17). Rezultat je vrlo sitnozrnata perlitna mikrostruktura nastala rekristalizacijom austenita. Sve pojave pri isoformingu osnivaju se na očvrnuću austenita i neposredno stvorenog novog perlita. Rezultat termomehaničke obrade sličan je kao kod perliforminga. U tablici 7 navedena su mehanička svojstva za neke isoforming obrađene čelike.



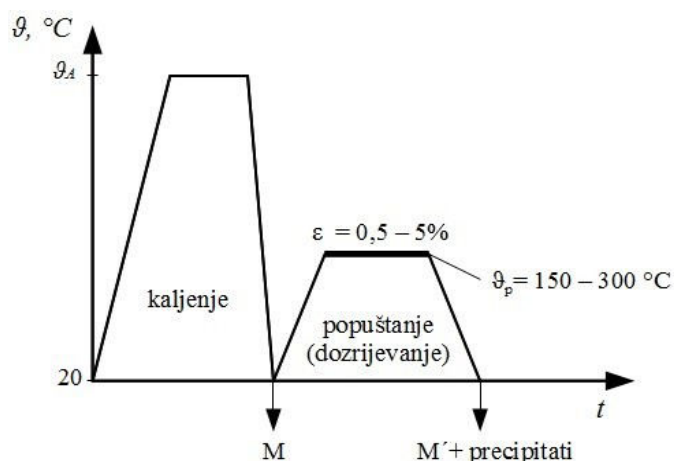
Slika 17 – Dijagram isoforming postupka prikazan u izotermičkom TTT dijagramu

Tablica 7 – Mehanička svojstva isoforming obrađenih čelika

Isoforming – oblikovanje $\varepsilon = 70\%$ pri $600\text{ }^{\circ}\text{C}$					
Oznaka čelika	$R_m, \text{N/mm}^2$	$R_{p0,2}, \text{N/mm}^2$	$A_5, \%$	KV pri $20^{\circ}\text{C}, \text{J}$	$\vartheta_{\text{Prel}}, ^{\circ}\text{C}$ (za 54 J)
30Mn5	800	735	21,5	195	-96
34Cr4	865	715	22	155	-
34CrMo4	860	770	14	100	-120

Marforming postupak

Ovim postupkom deformira se martenzitna mikrostruktura i to na dva načina: ili između dva popuštanja zakaljenog čelika – tzv. deformacijsko popuštanje, ili tijekom popuštanja (dozrijevanja ili starenja) zakaljenog čelika – tzv. dinamičko deformacijsko starenje (slika 18). U ovom slučaju martenzit je otvrdnut deformacijom, nije njome i nastao kao kod TRIP postupka. Postiže se znatno povišenje granice razvlačenja, uz samo malo sniženje istezljivosti. Za provođenje ovog postupka prikladni su čelici sa 0,3 – 0,4 %C kod kojih u kaljenoj strukturi prevladava masivni martenzit nad igličastim



Slika 18 – Postupak marforming – dinamičko deformacijsko starenje

4.5.4. Korozijski postojani precipitacijski očvrtnuti čelici

Razvojem korozijski postojanih precipitacijski očvrtnutih čelika (**PH – Precipitation Hardened** čelika) željelo se ostvariti visoku granicu razvlačenja uz istovremeno zadržavanje visoke korozijske postojanosti.

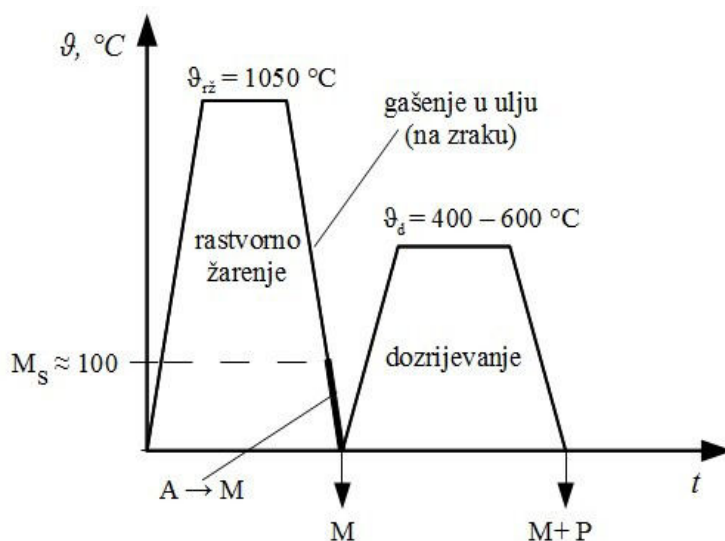
Kod precipitacijski očvrtnutih čelika očvrtnuće se postiže kroz postupak rastvornog žarenja i dozrijevanja, a do očvrtnuća dolazi izlučivanjem karbida, nitrida i/ili precipitata intermetalnih spojeva. Oko fino raspršenih precipitata zbog izvitoperenosti rešetke dolazi do pojave unutarnjih naprezanja što otežava gibanje dislokacija i time raste čvrstoća i tvrdoća legure.

S obzirom na mikrostrukturu prije precipitacije razlikuju se:

- martenzitni PH-čelici,
- poluaustenitni PH-čelici,
- austenitni PH-čelici.

Martenzitni PH-čelici

Ovi čelici sadrže približno oko 0,05% C, 14-17% Cr, 4-6% Ni, oko 3% Cu, uz dodatke Mo, Al i Nb(<0,4%). Postupak očvrtnuća provodi se preko toplinske obrade koja se sastoji od rastvornog žarenja na oko 1050 °C, zatim gašenja u ulju ili na zraku i na kraju slijedi dozrijevanje na temperaturi 400-600 °C (slika 19). Dozrijevanjem se unutar martenzita stvorenog gašenjem izlučuju precipitati bakra, a manja količina zaostalog austenita transformira se u martenzit.



Slika 19 – Toplinska obrada martenzitnih PH-čelika

Poluaustenitni PH-čelici

Imaju sličan kemijski sastav kao i martenzitni PH-čelici (0,05-0,1% C, 13-17% Cr, 7-9% Ni) uz neke od dodataka Mo, Ti, Al, V i N. Gašenjem s temperature rastvornog žarenja do sobne temperature postiže se austenitno-feritna mikrostruktura koja ima dobru obradivost odvajanjem čestica. Nakon toga austenit, kojeg ima 60-90%, prevodi se u martenzit na jedan od 3 načina:

- hlađenjem s temperature žarenja (pri 920-960 °C ili pri 720-760 °C) nastaje sekundarni martenzit kao u završnom stadiju popuštanja,
- hladnim oblikovanjem pri čemu nastaje deformacijski martenzit (provodi se vrlo rijetko),
- dubokim hlađenjem (provodi se vrlo rijetko).

Tako dobivena martenzitno-feritna mikrostruktura s eventualno niskim udjelima zaostalog austenita podvrgava se dozrijevanju pri temperaturama od 480 do 600 °C. Tijekom dozrijevanja u feritu, a zatim u martenzitu precipitiraju slijedeće vrste faza (ovisno o sastavu čelika): Ni_3Al , Ni_3Ti , Fe_2Mo , VN. Postizive vrijednosti $R_{p0,2}$ dostižu i do 1800 N/mm², ovisno o temperaturi dozrijevanja. Mehanička svojstva za neke poluaustenitne PH-čelike navedena su u tablici 8.

Tablica 8 – Mehanička svojstva poluaustenitnih PH-čelika

Oznaka čelika	Dozrijevanje ϑ_d , °C / t, h	R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A_5 , %
X7CrNiAl17-7	510/1	1650	1550	6
X6CrNiTi17-7	455/1	1850	1800	2
X8CrNiMo17-5	500/3	1300	1060	12
X10CrCoMoV14-14-5	2 x 370/2	2050	1510	10

Austenitni PH-čelici

To su niskougljični čelici sa manje od 0,1% C, visokolegirani s 14-18% Cr i sa više od 25% Ni, uz dodatak jednog ili više legiranih elemenata: Mo (1-2,5%), Ti (<2%), Cu (<3%), Al (<0,35%), Nb (<0,45%), P (<0,25%), V, Mn, Si i N.

Toplinska obrada sastoji se od rastvornog žarenja pri 950 – 1200 °C i dozrijevanja pri 700 – 800 °C u trajanju od 15 do 20 sati. Kako ovdje nema pretvorbe u martenzit postiže se skromno očvrnuće ($R_{p0,2}$ do 900 N/mm²) i to samo precipitacijom faza tijekom dozrijevanja. To su pretežno faze Ni_3Al i Ni_3Ti , a u manjoj mjeri σ -faze (FeCr , FeMo), Fe_2Mo , $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$, Cr_2N , VC i VN ovisno o sastavu čelika. Unatoč postojanju precipitata, austenitni čelici su otporni na opću koroziju nakon dozrijevanja, ali nisu otporni na napetosnu koroziju. Tablica 9 sadrži parametre toplinske obrade i svojstva nekih austenitnih PH-čelika.

Tablica 9 – Parametri toplinske obrade i mehanička svojstva austenitnih PH-čelika

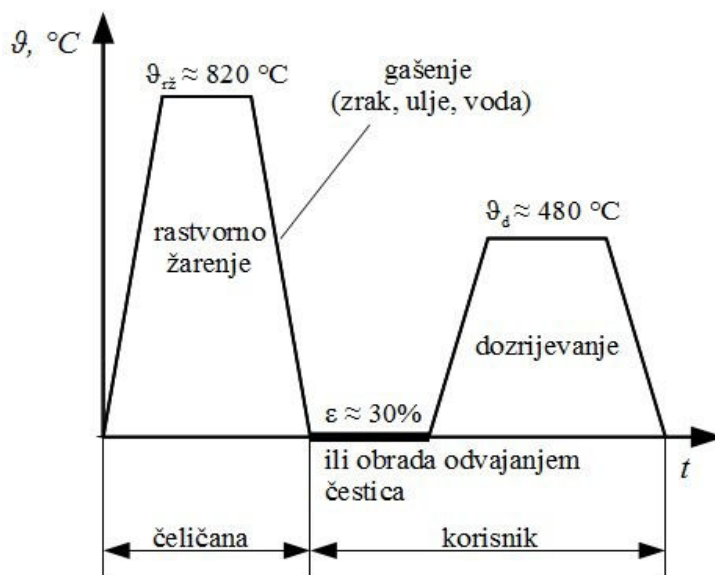
Oznaka čelika	Toplinska obrada		Mehanička svojstva			
	ϑ_{rz} , °C	ϑ_d , °C / t, h	R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A_5 , %	KU_{DVM} , J
X5NiCrTi26-15	900	725/16	1000	700	25	110
X30CrNiMn19-9-4	1120	730/16	1180	880	19,5	-
X42CrNiMn	1180	800/9	950	620	15	30

4.5.5. Maraging čelici

Naziv maraging dolazi iz engleskog "martensite aging" (dozrijevanje martenzita). Po sastavu su niskougljični čelici sa manje od 0,03% C, visokolegirani u ternarnom sustavu Fe-Ni-Co ili podsustavima Fe-Ni-Cr i Fe-Co-Cr s dodacima Mo, Ti, Al i Co i eventualno B i Zr. Uobičajeno sadrže oko 18% Ni, 7-14% Co, 3-6% Mo, 0,15-2% Ti, 0,05-0,2% Al. Visoka čvrstoća ovih čelika dolazi od precipitacije intermetalnih spojeva.

Toplinska obrada maraging čelika sastoji se od rastvornog žarenja na temperaturi oko 820 °C i dozrijevanja pri temperaturi oko 480 °C (slika 20). Nakon rastvornog žarenja čelik se mora intenzivno gasiti u vodi, ulju ili na zraku čime se dobiva prezasićeni masivni *nikl-martenzit*. Žarenje i gašenje se obično provodi u čeličani. Dozrijevanjem u nikl-martenzitu precipitira niz fino dispergiranih intermetalnih spojeva čiji sastav ovisi o sastavu čelika (Ni_3Al , Ni_3Ti , Fe_2Mo ,

(Fe,Co)₂Mo, FeCr itd.). Ove faze visoke tvrdoće sprječavaju gibanje dislokacija i tako povisuju granicu razvlačenja ($R_{p0,2} > 2200 \text{ N/mm}^2$) i vlačnu čvrstoću ($R_m = 1900\text{-}2900 \text{ N/mm}^2$). Pri tako visokim vrijednostima granice razvlačenja vrlo su povoljne vrijednosti lomne žilavosti. Ostale karakteristike maraging čelika su: izvrsna plastična svojstva, velika stabilnost pri toplinskoj obradi, izvrsna zavarljivost i osrednja postojanost pri niskim i visokim temperaturama. U tablici 10 navedeni su parametri obrade i postiziva svojstva za neke čelike ove skupine.



Slika 20 – Dijagram postupka toplinske obrade maraging čelika

Tablica 10 – Mehanička svojstva "maraging" čelika

Oznaka čelika	Toplinska obrada		Mehanička svojstva nakon dozrijevanja			
	Rastvorno žarenje $\Theta_{rz}, ^\circ\text{C} / t, h$	Dozrijevanje $\Theta_d, ^\circ\text{C} / t, h$	$R_m, \text{N/mm}^2$	$R_{p0,2}, \text{N/mm}^2$	$A_5, \%$	KU_{DVM}, J
X2NiCoMo18-8-5	820/1	480/3	1920	1720	8	20
X2NiCoMo18-9-5	820/1	480/3	1960	1910	7	30
X2NiCoMoTi18-12-4	820/1	500/6	2350	2260	6	10

4.5.6. Primjena visokočvrstih i ultračvrstih čelika

Visokočvrsti i ultračvrsti čelici primjenjuju se kod statički i dinamički visokoopterećenih konstrukcija. Koji će se čelik primjeniti ovisi o kombinaciji svojstava koja se zhtjevaju kod određene primjene (npr. da li su bitnija mehanička svojstva ili otpornost na koroziju). Primjeri primjene su visokotlačni spremnici kod transportnih zrakoplova i brodova, kućišta raketnih motora (slika 21) i slične konstrukcije.



Slika 21 – Kućište raketnog motora izrađenog od "maraging" čelika

4.6. Korozijski postojani čelici

Korozija je spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija zbog kemijskih ili elektrokemijskih procesa. Korozijskim procesima dolazi do promjena na površini ili u nutrini koje izazivaju gubitak materijala i promjenu svojstava. Vrste korozije su kemijska (kemijske reakcije na površini npr. oksidacija) i elektrokemijska (pod djelovanjem elektrolita), a osnovni oblici korozije kod čelika su: opća korozija, rupičasta korozija, korozija u procjepu (zazoru), interkristalna korozija, i drugi tipovi selektivne korozije (erozija, kavitacija, tribokorozija).

Korozijska postojanost predstavlja sposobnost materijala da se suprotstavi negativnom djelovanju korozivnog medija. Procjenjuje se i mjeri preko: gubitka mase (debljine) i volumena, promjene mehaničkih i ostalih svojstava tijekom korozijskog djelovanja, opažanja pojava površinskog oštećenja ili strukturnih promjena u nutrini presjeka kao i na druge načine. Korozijski je postojaniji onaj materijal kod kojeg u jednakim vanjskim uvjetima dolazi do manje intenzivnog razaranja na površini ili do neželjenih promjena mikrostrukture.

Postoje dva osnovna uvjeta korozijske postojanosti čelika.

Prvi uvjet jest da maseni udio kroma u čeliku mora biti barem 12% (i više), s time da krom mora biti potpuno otopljen u metalnoj osnovi, a nikako ne smije biti sastvani dio karbida ili drugih strukturnih tvorevina. Krom s kisikom iz zraka na površini čelika formira stabilni oksidni sloj koji sprečava daljnju oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima. Taj pasivni sloj je ekstremno tanak (1 do 5 nm), vrlo dobro prianja uz površinu nehrđajućeg čelika i samoobnovljiv je u različitim medijima.

Drugi uvjet korozijske postojanosti čelika je monofazna mikrostruktura. Kod čelika čija se mikrostruktura sastoji samo od jedne faze izbjegnuta je opasnost od nastajanja glavanskih članaka koji u vodljivom mediju mogu prouzročiti korozijsko trošenje materijala.

Korozijski postojani čelici se mogu podijeliti prema kemijskom sastavu na: Cr, Cr-Ni, Cr-Ni-Mo i Cr-Mn čelike.

Prema mikrostrukтури ovi čelici mogu se podijeliti na:

- martenzitetne (supermartenzitetne),
- martenzitetno-feritni,
- feritne,
- austenitne,
- dupleks (feritno-austenitne).

4.6.1. Martenzitni korozijski postojani čelici

Martenzitni korozijski postojani čelici su legure iz sustava Fe-Cr-C. Njihovo osnovno svojstvo je izvanredna kombinacija dobre korozijske postojanosti, visoke tvrdoće i čvrstoće, dobre otpornosti na toplinski i mehanički umor i izvrsne otpornosti na trošenje. Mehanička svojstva i kemijska postojanost martenzitnih nehrđajućih čelika ovise o kemijskom sastavu i provedenoj toplinskoj obradi. Martenzitni nehrđajući čelici nemaju tako dobru korozijsku postojanost kao drugi nehrđajući čelici jer često imaju dvofaznu martenzitno-karbidnu mikrostrukturu. Udio ugljika kreće se u rasponu 0,15 – 1%, a udio kroma je u pravilu preko 13%. Često sadrže i vanadij, molibden i nikal. Mala toplinska vodljivost ovih čelika zahtjeva postepeno ugrijavanje na temperaturu austenitizacije i gašenje u ulju ili u vakuumu (zbog opasnosti od oksidacije). Što je viši udio C i Cr to će biti potrebna viša temperatura austenitizacije da se otopi što više ugljika u austenitu (zbog zakaljivosti) i što više kroma (zbog korozijske postojanosti).

Legirni elementi prije toplinske obrade mogu biti jednim dijelom otopljeni u austenitnoj ili feritnoj metalnoj osnovi, a ostatak (Cr, W, Mo, V i Ti) može s ugljikom tvoriti karbide. Ova raspodjela legirnih elemenata ima važnu ulogu u formiranju mikrostrukture i postizanju željenih svojstava. Postupnim otapanjem karbida na visokoj temperaturi, ugljik i karbidotvorci prelaze u austenit i preostale karbide. Posljedica toga su sve niže temperature M_s i M_f , više zaostalog austenita u mikrostrukтури i lošija mehanička svojstva.

Toplinska obrada martenzitnih korozijski postojanih čelika sastoji se od sljedećih faza:

1. Žarenje (sferoidizacijsko)
2. Austenitizacija
3. Gašenje
4. Popuštanje
5. Duboko hlađenje (po potrebi)
6. Višestruko popuštanje

Žarenje (sferoidizacijsko)

Martenzitni nehrđajući čelici isporučuju se u žrenom stanju zbog lakšeg oblikovanja u traženi oblik. Žarenjem se smanjuje tvrdoća, poboljšava oblikovljivost u hladnom stanju i obradivost odvajanjem čestica.

Austenitizacija

Cilj je postizanje austenitne mikrostrukture sa potpuno ili djelomično otopljenim karbidima. Parametri austenitizacije (T , t) su ključni za postizanje željenih svojstava čelika, prije svega tvrdoće i korozijske postojanosti.

Gašenje (nadkritično hlađenje)

Većina martenzitnih čelika je kaljiva na zraku, ali se gašenje uglavnom provodi u ulju da se osigura potpuni prelaz austenita u martenzit. Zaostali austenit snizuje tvrdoću, doprinosi smanjenju žilavosti nakon popuštanja, a može se izbjeći dubokim hlađenjem. U gašenom stanju čelik je tvrd, izrazito krhak i s puno zaostalih naprezanja.

Duboko hlađenje

Provodi se kod martenzitnih čelika kojima je M_f temperatura ispod sobne. Dubokim hlađenjem sav zaostali austenit prelazi u martenzit. Sredstvo za hlađenje može biti suhi led ili tekući dušik, a da se spriječi toplinski šok brzina hlađenja ne biti veća od 2 °C/min. Zaostali austenit vrlo sporo prelazi u martenzit tako da je vrijeme hlađenja između 24 i 36 sati.

Popuštanje (visokotemperaturno)

Cilj i svrha popuštanja je povišenje žilavosti martenzita postignutog kaljenjem, sniženje zaostalih naprezanja u martenzitu i postizanje dimenzijske stabilnosti pretvorbom zaostalog austenita u martenzit i karbide popuštanja. Temperatura popuštanja je uvijek niža od temperature pretvorbe u austenit.

Sastav i svojstva nekih martenzitnih nehrđajućih čelika opisani su tablicama 11 i 12.

Tablica 11 – Kemijski sastav martenzitnih nehrđajućih čelika

Oznaka čelika	Maseni udio pojedinih elemenata, %							
	C	Si maks.	Mn maks.	Ni maks.	P maks.	S maks.	Cr	ostali
X12Cr13	0,12	1	1,5	0,75	0,04	0,015	11,5-13,5	
X15Cr13	0,15	1	1	-	0,04	0,015	12-14	
X55CrMo14	0,55	1	1	-	0,04	0,015	13-15	Mo: 0,5-0,8, V:0,15
X40CrMoVN16-2	0,40	1	1	0,5	0,04	0,015	14,16	Mo: 1-2,5, V:1,5, N:0,1-0,3

Tablica 12 – Mehanička svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika

Oznaka čelika	Stanje	R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	A, %
X12Cr13	Žareno	485	275	20
	Srednje popušteno	690	550	15
	Visoko popušteno	825	620	12
X15Cr13	Žareno	485	275	20
	Srednje popušteno	690	550	15
	Visoko popušteno	825	620	12
X55CrMo14	Žareno	760	-	-
	Srednje popušteno	795	620	15
	Visoko popušteno	1210	930	13
X40CrMoVN16-2	Žareno	760	450	14

Posebna podskupina u ovoj grupi čelika su supermartenzitni nehrđajući čelici poznatih i pod nazivom mekomartenzitni čelici. Razvijeni su krajem 20. stoljeća kao alternativa za skuplje austenitne i dupleks nehrđajuće čelike. Zahvaljujući nižem udjelu ugljika imaju bolju zavarljivost, a uz to i bolju žilavost i korozijsku postojanost od drugih martenzitnih čelika. Posjeduju visoku korozijsku postojanost u tekućinama koje sadrže CO₂, ali su ograničeno postojani na H₂S.

4.6.2. Feritni korozijski postojani čelici

Feritni nehrđajući čelici su legure temeljene na Fe-Cr-C sustavu u kojima je glavni legirni element krom, a mogu sadržavati i manju količinu Mo, Ti, Nb i drugih elemenata. Zadržavaju feritnu strukturu pri gotovo svim temperaturama pa se ne mogu zakaliti i feromagnetični su. Osnovna karakteristike ovih čelika su: dobra otpornost na napetosnu i rupičastu te koroziju u procijepu. Primjenjuju se u slučajevima gdje je otpornost na koroziju važnija od mehaničkih svojstava. Ne

primjenjuju se na temperaturi višoj od 400°C zbog nastanka krhkih faza. Teže se zavaruju, osobito vrste sa srednjim i visokim sadržajem kroma. Određeno povećanje čvrstoće feritnih čelika moguće je postići dodavanjem dušika i ugljika ali to nosi opasnost od pojave krhkosti. U praksi se, za povećanje čvrstoće feritnih čelika, najčešće koristi hladna deformacija. Feritni čelici se najčešće isporučuju u žarenom i toplo valjanom stanju.

Postoje tri uzroka smanjenja žilavosti feritnih čelika: krhkost 475 °C, izazvana alfa-prim (α') fazom, formiranje sigma faze i visokotemperturna krhkost.

Krhkost 475 °C javlja se kod duljeg držanja feritnog čelika na temperaturama između 425 i 550 °C zbog nastajanja α' -faze. Ova pojava izaziva povećanje tvrdoće i vlačne čvrstoće i drastičan pad žilavosti, istezljivosti i korozijske postojanosti. Kristalna struktura α' -faze jednaka je onoj α -faze (bcc-rešetka), ali ima potpuno različit kemijski sastav. Dok je α -faza bogata željezom, α' -faza je bogata kromom (oko 80% Cr), a uz to je nemagnetična i ekstremno sitna (15 do 30 nm). Sitni precipitati α' -faze u mikrostrukturi se mogu uočiti kao nešto šire granice i tamnija unutrašnjost feritnog zrna. Pojava krhkosti 475°C je reverzibilna, α' -faza se otapa, a dobra svojstva čelika vraćaju žarenjem na temperaturi između 550 i 600°C.

Do pojave krhkosti kod feritnih čelika može doći i nastajanjem σ -faze koja se javlja kod legura sa 20-70 %Cr na temperaturama od 500 do 800°C. Nastajanje σ -faze ima poguban utjecaj na mehanička i korozijska svojstva čelika. Sklonost nastanku σ -faze raste s povećanjem sadržaja Cr i Mo, pri čemu molibden ima 4 do 5 puta veći utjecaj od kroma. Uklanjanje σ -faze obavlja se kratkotrajnim žarenjem čelika na temperaturi iznad 800 °C.

Uzrok visokotemperturne krhkosti kod feritnih čelika su mikrostrukturne promjene na temperaturi od $0,7 \times T_f$ koje nastaju pri zavarivanju i termomehaničkoj obradi čelika. Na visokoj temperaturi intersticijski elementi su otopljeni u feritu (ili feritu i austenitu), a hlađenjem nastaju karbidi, nitridi i karbonitridi u obliku sitnih precipitata. Osjetljivost čelika na ovaj tip krhkosti ovisi o udjelu Cr i intersticijskih elemenata (C, N, O) i o veličini kristalnih zrna. Promjene narušavaju žilavost i korozijsku postojanost čelika, a mogu se ukloniti žarenjem čelika na temperaturi između 730 i 790 °C. Za neke feritne čelike svojstva su navedena u tablici 13.

Tablica 13 – Mehanička svojstva feritnih nehrđajućih čelika

Oznaka čelika	R_m , N/mm ² (min.)	R_e , N/mm ² (min.)	A, % (min.)
X2CrMoTi18-2	415	275	20
X2CrTi12	380	170	20
X2CrTiNi18	415	205	22
X6CrMo17-1	450	240	22

Superferitni nehrđajući čelici (ELA – Extra Low Additions)

Povišenjem čistoće sastava čelika pročišćavanjem u vakuumskim pećima i u elektronskom mlazu, sniženjem udjela C, povišenjem udjela Cr i Mo te dodatkom stabilizatora Ti i Nb mogu se poboljšati neka od loših svojstava feritnih čelika. Na taj se način postiže povišena otpornost na napetosnu, rupičastu i interkristalnu koroziju, povišena žilavost na niskim temperaturama i povišena granica razvlačenja.

4.6.3. Martenzitno-feritni korozijski postojani čelici

Ovi čelici sadrže do 0,2% C i 13-17% Cr, a optimalna svojstva postižu se u kaljenom i visokopopuštenom stanju. Njihova je čvrstoća, tvrdoća i otpornost na trošenje viša od feritnih čelika, ali im je zato manja korozijska postojanost. Za razliku od feritnih čelika ne naginju krhkosti. Postojani

su na djelovanje vode, vodene pare i vlažnog zraka.

4.6.4. Austenitni korozijski postojani čelici

Kod ove vrste čelika maseni udio ugljika treba biti što manji ($<0,15\%$ C) jer je onda manja opasnost od stvaranja karbida tipa $Cr_{23}C_6$. Osnovni legirni elementi su Cr (16-26%), Ni (8-20%) i Mn (4-15,5%), a kao dodatni legirni elementi služe Mo, N, Al, Cu, Ti, Nb, Ta, Se i S (tablica 14). Ni se dodaje kao gamageni element koji mora prevladati alfageno djelovanje Cr da bi se mogla formirati austenitna mikrostruktura. Dodatno legiranje s Mo, Ti, Nb i Ta pospješuje pojavu ferita u mikrostrukturi ili djeluje stabilizirajuće kod opasnosti od interkristalne korozije, a povišen maseni udio N djeluje naročito na povišenje čvrstoće i na otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju. Se i S se eventualno dodaju radi poboljšavanja obradivosti odvajanjem čestica.

Kod ovih čelika postoji opasnost od pojave interkristalne korozije zbog precipitacije karbida po granicama zrna (senzibilizacije). Duljim zadržavanjem između 425 i 870°C formiraju se po granicama zrna karbidi tipa $M_{23}C_6$, a količina karbida ovisi o temperaturi i vremenu. Formiranje karbida smanjuje sadržaj kroma u području oko granica zrna i ako njegov udio u željeznoj matrici padne ispod 12%, u tom području može doći do interkristalne korozije. Sensibilizacija također smanjuje otpornost na rupičastu, napetosnu i koroziju u procjepu, a degradiraju se i mehanička svojstva. Sensibilizacija se može spriječiti izborom čelika sa manjim udjelom ugljika i onih koji u kemijskom sastavu imaju stabilizatore Ti i/ili Nb. Ako je već došlo do senzibilizacije stanje se može popraviti kratkotrajnim žarenjem na visokoj temperaturi uz naglo hlađenje ili dugotrajnim žarenjem na nižoj temperaturi.

Austenitni čelici su nemagnetični, dobro oblikovljivi u hladnom stanju, imaju dobru žilavost na vrlo niskim temperaturama i visoku otpornost na puzanje pri visokim temperaturama. Očvršćivanje se može provesti samo hladnom deformacijom. Vrijednosti vlačne čvrstoće kod austenitnih čelika kreću se u rasponu 520-760 N/mm², granice razvlačenja 205-275 N/mm², a istezljivost je vrlo visoka i kreće se u rasponu 40-60% (tablica 15).

Tablica 14 – Austenitni nehrđajući čelici – kemijski sastav

Oznaka čelika	Maseni udio pojedinih elemenata, %									
	C	Si maks.	Mn maks.	Ni	P maks.	S maks.	Cr	Mo maks.	N	Ti maks.
X2CrNi18-9	0,02	1	2	8-10,5	0,045	0,015	17,5-19,5	-	maks. 0,11	-
X2CrNi18-10	0,02	1	2	8,5-11,5	0,045	0,015	17,5-19,5	-	0,11-0,22	-
X5CrNi18-10	0,05	1	2	8-10,5	0,045	0,015	17,5-19,5	-	maks. 0,11	-
X6CrNi25-20	0,06	0,7	2	19-22	0,035	0,015	24-26	-	maks. 0,1	-
X5CrNiMo17-12-2	0,05	1	2	10-13	0,045	0,015	16,5-18,5	2-2,5	maks. 0,11	-
X6CrNiMoTi17-12-2	0,06	1	2	10,5-13,5	0,045	0,015	16,5-18,5	2-2,5	-	0,7
X1CrNiMoN25-22-2	0,01	0,7	2	21-23	0,025	0,01	24-26	2-2,5	0,1-0,16	-

Tablica 15 – Austenitni nehrđajući čelici - mehanička svojstva

Oznaka čelika	R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	KV, pri +20°C, J	KV, pri -196°C, J	A, %	Grupa čelika po CR ISO 15608
X2CrNi18-9	450-700	180	100	60	35-45	8.1
X2CrNi18-10	550-760	270	100	60	30-40	8.1
X5CrNi18-10	500-750	195	100	60	35-45	8.1
X6CrNi25-20	510-750	200-220	100	-	35	8.2
X5CrNiMo17-12-2	510-710	205	100	60	35-45	8.1
X6CrNiMoTi17-12-2	500-700	200-240	100	60	30-40	8.1
X1CrNiMoN25-22-2	540-740	260	100	60	35-40	8.2

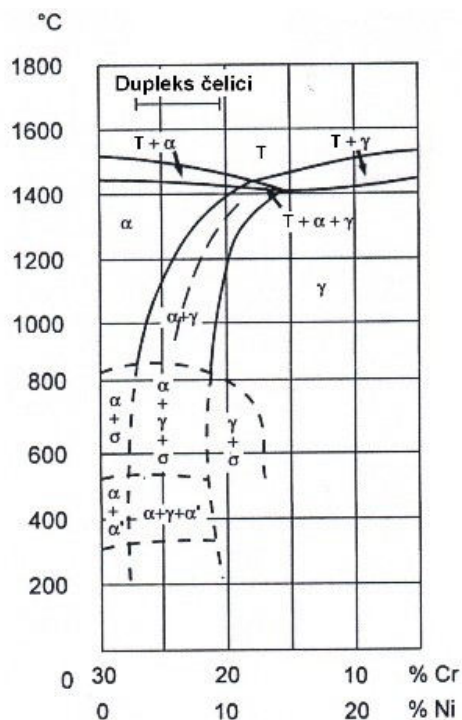
Austenitni čelici sniženog masenog udjela ugljika

Radi se o posebnoj podvrsti austenitnih nehrđajućih čelika kod kojih maseni udio ugljika iznosi manje od 0,03%. Snižanjem udjela ugljika postiže se povećana otpornost na interkristalnu koroziju zbog manje mogućnosti stvaranja Cr-karbida, ali je snižena čvrstoća i otpornost na puzanje. Zavarljivost i oblikovljivost je bolja nego kod klasičnih austenitnih čelika.

4.6.5. Dupleks (austenitno-feritni) čelici

Dupleks čelici imaju dvofaznu mikrostrukturu koja se sastoji od ferita i austenita. Omjer faza ovisi o kemijskom sastavu i toplinskoj obradi i većinom se kreće na razini 50:50. Osnovni legirni elementi su Cr i Ni, a još se dodaju N, Mo, Cu, Si, W. Ovi čelici ne ispunjavaju drugi osnovni uvjet korozijske postojanosti (monofazna mikrostruktura), ali je zato povećana postojanost na napetosnu koroziju u kloridnom okolišu kao i na H₂S. Korozijska postojanost ovih čelika ugrubo je na razini austenitnih čelika, dok su vrijednosti R_m (700-1100 N/mm²) i $R_{p0,2}$ (500-800 N/mm²) više nego kod austenitnih čelika. Vrijednosti udarnog rada loma kreću se do 170 J.

Svi dupleks čelici primarno kristaliziraju kao 100%-tni ferit. Daljim hlađenjem formira se austenitna faza, prvo po granicama, a onda i po određenim kristalografskim ravninama unutar feritnog zrna. Pri procesu transformacije ferita u austenit, legirni elementi koji stabiliziraju austenit (ugljik, nikal, dušik i bakar) difundiraju u austenit, a legirni elementi koji podržavaju ferit (krom, molibden i volfram) otapaju se u feritu. Količina austenita ovisi o brzini ohlađivanja ferita, vrsti i udjelu legirnih elemenata te o brzini difuzije svakog pojedinog legirnog elementa. Optimalna fazna ravnoteža kod dupleks čelika postiže se pri podjednakim volumnim udjelima ferita i austenita. Zato se za određeni kemijski sastav brzina ohlađivanja podešava tako da u temperaturnom intervalu između 1050 i 1150 °C u mikrostrukturi ima 50% ferita i 50% austenita. Dalje se hlađenje nastavlja gašenjem u vodi što osigurava zadržavanje postignutog faznog omjera i na sobnoj temperaturi. Osim postizanja izbalansiranog omjera ferita i austenita, gašenjem se također sprečava nastanak štetnih mikrostrukturnih faza koje se mogu formirati na temperaturama ispod 1000°C pri sporom hlađenju. Vrsta i količina precipitiranih faza ovisna je o vremenu i temperaturi, a njihovo izlučivanje uzrokuje snižavanje mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti. Pseudobinarni dijagram stanja za sustav Cr-Ni-Fe prikazuje slika 22.



Slika 22 – Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70% Fe

Tablica 16 sadrži kemijski sastav za neke duplex čelike, a njihova mehanička svojstva prikazana su tablicom 17.

Tablica 16 – Dupleks nehrđajući čelici - kemijski sastav

Oznaka čelika	Maseni udio pojedinih elemenata, %									
	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	N	Cu
X2CrNiN23-4	0,02	1	2	3,5-5,5	maks. 0,035	maks. 0,015	22-24	0,1-0,6	0,05-0,2	0,1-0,6
X2CrNiMoN22-5-3	0,02	1	2	4,5-6,5	maks. 0,035	maks. 0,015	21-23	2,5-3,5	0,1-0,22	-
X2CrNiMoCuN25-6-3	0,02	0,7	2	6-8	maks. 0,035	maks. 0,015	24-26	3-4	0,2-0,3	1-2,5
X2CrNiMoN25-7-4	0,02	1	2	6-8	maks. 0,035	maks. 0,015	24-26	3-4,5	0,24-0,35	-
X2CrNiMoSi18-5-3	0,02	1,4-2	1,2-2	4,5-5,2	maks. 0,035	maks. 0,015	18-19	2,5-3	0,05-0,1	-

Tablica 17 – Dupleks nehrđajući čelici - mehanička svojstva

Oznaka čelika	R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	KV, pri +20°C, J	A, %	Grupa čelika po CR ISO 15608
X2CrNiN23-4	600-850	400	90	20-25	10.1
X2CrNiMoN22-5-3	640-950	450	100	20-25	10.1
X2CrNiMoCuN25-6-3	690-1000	500	90	20-25	10.2
X2CrNiMoN25-7-4	730-1000	530-550	90	15-25	10.2
X2CrNiMoSi18-5-3	680-900	400-450	100	25	10.1

4.6.6. Primjena korozijski postojanih čelika

Korozijski postojani čelici primjenjuju se u industrijama gdje su konstrukcije i dijelovi konstrukcija izloženi agresivnim medijima. Primjeri su kemijska, petrokemijska i procesna industrija (slika 23).



Slika 23 – Tlačni spremnik izrađen od dupleks nehrđajućeg čelika

Boce za ronjenje se najčešće izrađuju od nehrđajućih čelika (slika 24).

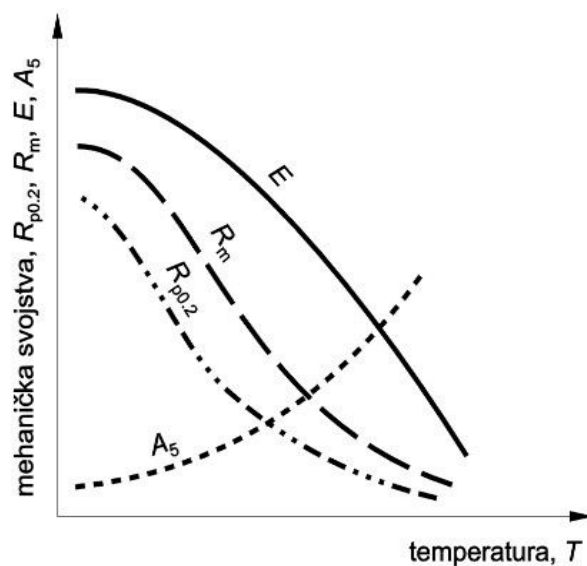


Slika 24 – Boce za ronjenje izrađene od austenitnog nehrđajućeg čelika

4.7. Čelici za povišene i visoke temperature

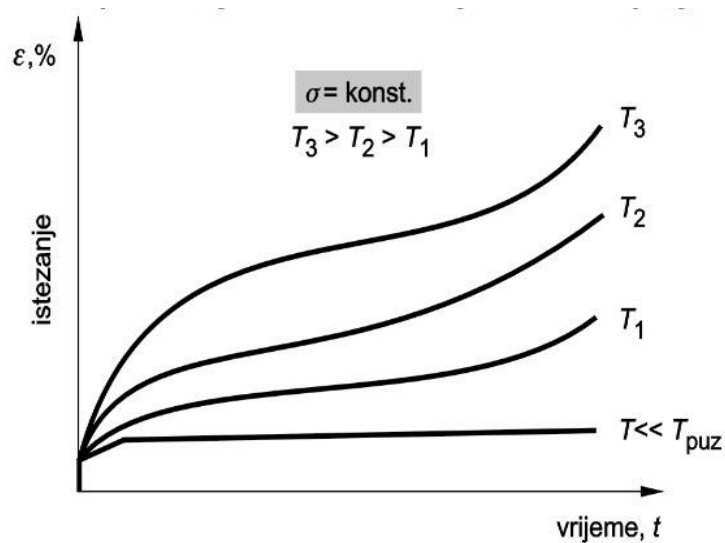
Kod čelika i željeznih materijala do 180 °C nema bitnijih promjena mehaničkih svojstava, pa se te temperature smatraju niskim. Radne temperature od 180 do 450 °C za čelik su povišene, a one iznad 450 °C visoke jer pri njima počinje puzanje čelika.

Na temperaturama iznad 180 °C dolazi do promjena kod mehaničkih svojstava čelika. Snizuje se granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i modul elastičnosti, a istovremeno se povisuje duktilnost i žilavost. Isto tako, na visokim temperaturama može doći do visokotemperaturne oksidacije, pougljičavanja ili razugljičavanja, te do pojava toplinske dilatacije, toplinskog šoka i toplinskog umora. Promjene mehaničkih svojstava pri povišenim i visokim temperaturama prikazuje slika 25.



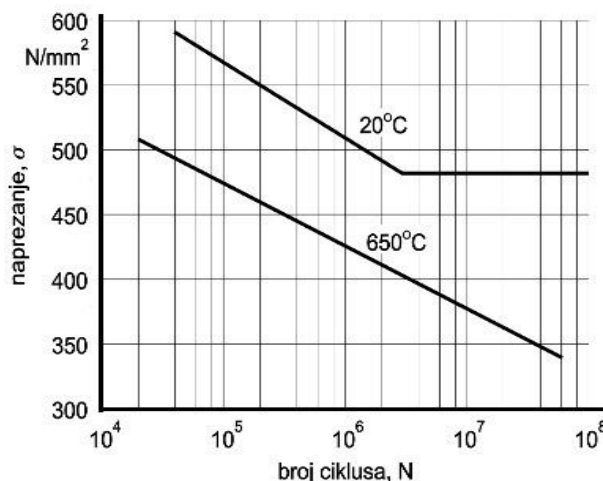
Slika 25 – Promjena mehaničkih svojstava s povišenjem temperature

Što je viša temperatura uz konstantno naprezanje u radu, to je veća brzina puzanja. Uz to, što je više naprezanje kod konstantne temperature, to je veća brzina puzanja i kraće vrijeme do pojave loma. Različiti čelici pokazuju veću ili manju otpornost na puzanje pri nekoj temperaturi i radnom opterećenju (slika 26).



Slika 26 – Pojava puzanja pri visokim temperaturama

Povišenjem temperature dinamička izdržljivost se smanjuje ili uopće nije izražena (slika 27).



Slika 27 – Promjena savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika povišenjem temperature

Za izbor materijala i proračun mehanički opterećenih dijelova konstrukcija pri povišenim temperaturama bitna su sljedeća mehanička svojstva:

- $R_{p0,2/9}$ – vrijednost konvencionalne granice razvlačenja pri radnoj temperaturi,
- $R_{m/9}$ – vrijednost vlačne čvrstoće pri radnoj temperaturi,
- E_9 – vrijednost modula elastičnosti pri radnoj temperaturi,
- A_9 – vrijednost istezljivosti pri radnoj temperaturi,
- $R_{p1/t/9}$ – vrijednost granice puzanja pri radnoj temperaturi za definirano vrijeme ispitivanja. To je ono napreznja koje nakon djelovanja u definiranom trajanju pri definiranoj temperaturi izaziva trajnu deformaciju od 1%,
- $R_{DVM/9}$ – granica puzanja po DVM pri definiranoj temperaturi,
- $R_{m/t/9}$ – vrijednost statičke izdržljivosti pri definiranoj temperaturi za određeno vrijeme djelovanja opterećenja. To je ono napreznja koje nakon definiranog vremena djelovanja na nekoj temperaturi izaziva lom.

Kako bi se poboljšala mehanička otpornost pri povišenim temperaturama čelici trebaju po mogućnosti sadržavati u kristalu mješancu legirne elemente koji koče pokretljivost atoma (npr. Mo i Co). Zatim, čelici se legiraju takvim elementima (Cr, Mo, W, V, Ti) koji tvore teško topive stabilne spojeve, karbide, nitride i intermetalne faze koji u obliku sitno dispergiranih čestica otežavaju gibanje dislokacija. Kod izbora legura prednost treba dati materijalima s kubično plošno centriranom (FCC) rešetkom kod koje je pokretljivost atoma znatno manja nego kod prostorno centrirane kubične (BCC) rešetke. Poželjno je upotrebljavati čelike sa grubljim zrnom ili čelike sa bainitnom mikrostrukturom koja daje optimalnu otpornost na puzanje pri temperaturama oko 500 °C.

Vrste mehanički otpornih čelika pri povišenim temperaturama su:

- ugljični (nelegirani) čelici,
- niskolegirani čelici,
- visokolegirani martenzitni čelici
- visokolegirani austenitni čelici.

Čelici za rad na visokim temperaturama su:

- vatrootporni čelici.

4.7.1. Ugljični (nelegirani) čelici

Primjer čelika iz ove skupine su čelici za kotlovske limove.

Na osnovi uvjeta rada od čelika za kotlovske limove traže se sljedeća svojstva:

- dovoljna čvrstoća pri povišenim temperaturama radi djelovanja tlaka,
- zadovoljavajuća duktilnost (žilavost) kako bi se plastičnom deformacijom razgradila lokalna koncentracija naprezanja ili moguća preopterećenja,
- otpornost na dozrijevanje radi toga što čelik može biti hladno očvrstnut tijekom oblikovanja deformiranjem,
- umjerena korozijska otpornost prema vodi, vodenoj pari i lužinama,
- otpornost na interkristalnu koroziju,
- vrlo dobra zavarljivost.

Za ove čelike zajamčen je kemijski sastav i mehanička svojstva za koje su po normama propisane sljedeće karakteristike:

- sastav: niski % C (< 0,2 %) radi zavarljivosti, > 0,40 (0,55) % Mn radi postojanosti na dozrijevanje, > 0,02%, Al radi dezoksidacije taljevine, < 0,30 %Cr,
- vlačna čvrstoća (R_m) pri sobnoj temperaturi,
- granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) pri sobnoj i povišenim temperaturama do 400 °C,
- granica puzanja (R_{DVM}) pri temperaturama od 400 do 475 °C,
- istezljivost $A_5 \min = 9810/R_m \%$,
- udarni rad loma KU = 58 J nakon dozrijevanja pri 250 °C/1...2 sata,
- statička izdržljivost: pri $\vartheta = 400$ °C: $R_m/100000 = 130 \text{ N/mm}^2$; pri $\vartheta = 450$ °C: $R_m/100000 = 70 \text{ N/mm}^2$; pri $\vartheta = 500$ °C: $R_m/100000 = 30 \text{ N/mm}^2$

Tablica 18 sadrži karakteristike za tipična dva predstavnika ove skupine, čelik P235GH i P265GH.

Tablica 18 – Nelegirani čelici za kotlovske limove (izvod iz DIN-a 17175)

Oznaka čelika	Kemijski sastav, %		R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$ min., N/mm ² pri °C			R_{DVM} , N/mm ² pri °C		
	C, maks.	Mn, min.		20	200	400	400	450	475
P235GH	0,16	0,40	350-450	210	160	100	90	50	(30)
P265GH	0,20	0,50	410-500	240	180	120	100	60	(40)

4.7.2. Niskolegirani Mo i Mo-Cr čelici

Kod nelegiranih kotlovskih čelika pri temperaturama višim od 450 °C dolazi do rekristalizacije matrice i koagulacije cementita. Te se pojave kod niskolegiranih čelika za povišene temperature sprječavaju legiranjem karbidotvorcima Mo, Cr i V koji stvaraju kvalitetnije karbide (Cr_7C_3 , Mo_2C , V_4C_3) koji koče gibanje dislokacija i usporavaju puzanje, povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje. Mo dodatno povišuje temperaturu rekristalizacije i sprečava pojavu krhkosti popuštanja, a krom djeluje još na povišenje mehaničke otpornosti istezljivosti i oksidacijske postojanosti. Ovi čelici radi zavarljivost imaju nizak udio ugljika (< 0,25%). Područje primjene je do 550 °C jer pri višim temperaturama Mo_2C karbidi postepeno prelaze u Mo_6C karbide te koaguliraju, a metalna matrica osiromašuje na Mo što snižava rekristalizacijsku temperaturu. Ovi čelici se pretežno izrađuju u obliku cijevi i limova. Mikrostruktura ime je feritno-perlitna ako su normalizirani ili bainitna ako su poboljšani. Mehanička svojstva ovih čelika navedena su u tablici 19.

Tablica 19 – Niskolegirani Mo i Mo-Cr čelici za rad pri visokim temperaturama

Oznaka čelika	Mehanička svojstva										
	R _m , N/mm ² pri 20°C	R _{p0,2} , N/mm ² , pri °C				R _{p1/10000} , N/mm ² , pri °C				A ₅ ,% min.	KV, J min.
		20	200	400	500	450	500	530	580		
C35E	500-650	280	216	147	-	59	25	-	-	21	-
15Mo3	440-570	260	255	177	147	216	147	85		23	48
13CrMo4-4	440-590	290	275	206	177		186	78		22	48
22CrMo4-4	640-790	490		343		255	172	74		18	41
10CrMoV8-10	440-590	260	245	206	186		157	83	47	20	55
24CrMoV5-5	690-830	540	412	304	235	324	206	98		17	57

4.7.3. Visokolegirani super 12% Cr martenzitni čelici

Ova skupina čelika razvijena je iz martenzitne vrste X20Cr13 modificiranjem sastava kako bi se ostvarila veća mehanička otpornost pri temperaturama (do 600 °C) te istovremeno zadržala velika postojanost na opću koroziju. Čelici moraju sadržavati Mo (oko 1%) i do 12% Cr, pa se uz pravilno izvedeno kaljenje postiže potpuno martenzitna mikrostruktura uz što manji udio δ-ferita. Otpornost na puzanje kod ovih čelika povisuje disperzija karbida i precipitacija intermetalnih spojeva uz istovremeno otapanje Cr i Mo u martenzitu. Čelici su otporni na djelovanje vodika i na sulfidnu napetosnu koroziju (SSC) ako su popušteni na tvrdoću manju od 24 HRC. Kako sadrže Mo nisu podložni "krhkosti 475" kao feritni nehrđajući čelici. Dugotrajno izlaganje ovih čelika temperaturama iznad 620 °C uzrokuje umnažanje i koagulaciju karbida i intermetalnih spojeva čime se snižava otpornost na koroziju i puzanje.

Toplinska obrada ovih čelika sastoji se od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja (poboljšavanja). Temperature popuštanja kao i postiziva mehanička svojstva visokolegiranih super 12% Cr martenzitnih čelika ilustrira tablica 20.

Tablica 20 – Visokolegirani super 12% Cr martenzitni čelici – mehanička svojstva

Oznaka čelika	Popušteno θ _p °C	Mehanička svojstva pri 20 °C				Kratkotrajno vlačno spitivanje				Dugotrajno vlačno ispitivanje		
		R _m , N/mm ²	R _{p0.2} , N/mm ² min.	A ₅ , % min.	KV, J min.	R _{p0.2} , N/mm ² , pri θ °C				R _{p1/10⁴} , N/mm ² , pri θ °C		
						200	400	500	600	500	550	600
X19CrMo12-1	700-750	700-800	500	16	40	432	353	264	108	245	140	60
X11CrMoV12-1	560-620	930-1130	785	14	48	700	600	500	300	200	85	35
X20CrMoV12-1	680-750	700-850	500	16	40	432	353	264	108	245	145	77
X22CrMoV12-1	720-750	800-950	600	14	27	530	423	344	206	295	168	80
X19CrMoVNb11-1	550-700	900-1050	780	10	20	700	580	470	315	360	200	12
X20CrMoWV12-1	700-750	800-950	600	14	27	530	423	377	206	260	160	60

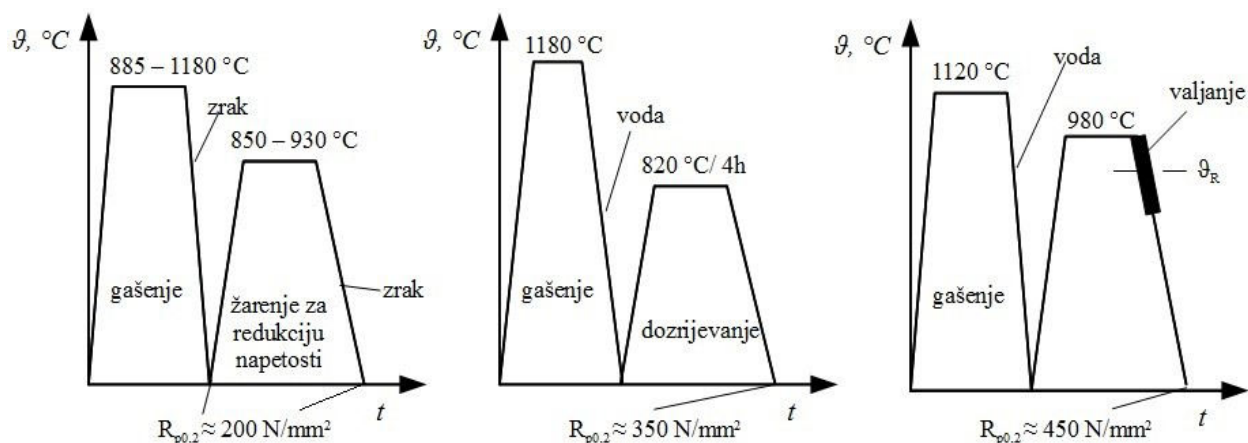
4.7.4. Visokolegirani austenitni Cr-Ni čelici

Ovim čelicima osim austenitne mikrostrukture s FCC rešetkom, mehaničku otpornost pri visokim temperaturama dodatno poboljšava legiranje s Mo, W, V, Ti i Nb koji omogućuju izlučivanje karbida te precipitaciju toplinski postojanih intermetalnih faza. Kod ovih čelika očvršnuće se postiže rastopnim žarenjem i gašenjem, rastopnim žerenjem i dozrijevanjem te toplim valjanjem i dozrijevanjem. Višestruko visokolegirani čelici (X50CoCrNi20-20-20, X5NiCrTi26-15, X6NiCrMoTi28-15) dozrijevanjem mogu vrlo jako očvrstnuti.

Kod ove skupine čelika čvrstoća porastom temperature pada sporo, a zbog visoke temperature rekristalizacije (iznad 900 °C, pa čak i iznad 1000 °C) moguća je dugotrajna primjena pri temperaturama od 600 do 750 °C.

Prema režimima toplinske obrade austenitni Cr-Ni čelici podijeljeni su u 3 skupine. Skupina I primjenjuje se u rastopno žarenom i gašenom stanju, skupina II se podvrgava dozrijevanju pri temperaturama višim od radnih, kod skupine III dozrijevanje se provodi uz hladno/toplo valjanje (slika 28).

Uz veliku otpornost na puzanje ovi čelici imaju i vrlo dobru kemijsku postojanost, odnosno vatrootpornost.



Slika 28 – Dijagrami postupaka toplinske obrade austenitnih toplinski visokopostojanih čelika

4.7.5. Vatrootporni čelici

Glavno svojstvo vatrootpornih čelika jest da zadržavaju dobra mehanička svojstva, ali i visoku otpornost na visokotemperaturnu koroziju (oksidaciju) tijekom dugotrajne uporabe na visokim temperaturama.

Pri temperaturama višim od 550 °C zbog djelovanja vrućeg zraka, vodene pare, agresivnih plinova i plamena, kod čelika dolazi do kemijske korozije izazvane intenzivnom oksidacijom. Kod nelegiranih čelika na površini se stvaraju željezni oksidi (FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3) koji nisu dovoljno kompaktni da bi spriječili daljnju difuziju kisika i porast debljine sloja, pa s vremenom dolazi do ljuštenja sloja i stvaranja novog oksidnog sloja. Kako bi se čelik zaštitio od stvaranja ogorina u obliku ljuski, dodatno se legira elementima koji imaju viši afinitet prema kisiku od željeza (Cr, Si, Al) i koji stvaraju tanke kompaktne okside koji dobro prijanjaju uz površinu. Na taj način čelik postaje otporan na intenzivnu oksidaciju odnosno otporan ljuštenju ili vatrootporan.

Za potpunu vatrootpornost gubitak mase ne smije biti veći od 1 g/m²h (pri definiranoj temperaturi) ili najviše 2 g/m²h (pri 50 °C višoj temperaturi) tijekom 120 sati izloženosti struji plinova koji sadrže kisik. Tokom ispitivanja, svaka 24 sata ispitni se uzorak hladi i s njega skida ogorina.

Od vatrootpornih čelika u praksi se često traži osim velike otpornosti na oksidaciju i dovoljna mehanička otpornost tj. dovoljna granica razvlačenja pri povišenim temperaturama i dovoljna otpornost na puzanje izražena preko vrijednosti granice puzanja R_{p1} za 1000 sati. Kod nekih čelika vatrootpornost i mehanička otpornost nisu jednako povoljne te tada uvjeti rada određuju koja će od tih svojstava doći u prvi plan pri izboru materijala.

Prema mikrostrukтури vatrootporni čelici mogu biti feritni (legirani sa Cr, Si i Al) ili austenitni (legirani sa Cr, Ni, Si, Al i Ti), tablica 21. Razlog tome je što vatrootporni čelici ne smiju imati mikrostrukturnih pretvorbi kod kojih dolazi do promjene volumena. Austenitni čelici su otporni na plinove s mnogo dušika, otporniji puzanju od feritnih, ali i znatno skuplji. Feritni čelici imaju nižu otpornost na puzanje, skloni su pogrubljenju zrna nakon zavarivanja ili dugotrajne izloženosti visokim temperaturama što inducira krhkost, ali su otporniji na plinove koji sadrže sumpor.

Tablica 21 – Vatrootporni čelici

Oznaka čelika	*	Žarenje °C/sred	Mehanička svojstva pri 20 °C			$R_{p1/1000}$, N/mm ² pri 9 °C						Vatrootpornost na zraku do °C
			R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A_5 , % min.	500	600	700	800	900	1000	
X10NiCrAlTi32-20	F	750-800/z,v	420-620	220	20	50	17,5	4,7	2,1	1,0	-	800
X10CrSi13		750-800/z	540-690	345	15	60	21	5,5	2,2	0,8	-	950
X10CrAl18		800-850/z	490-640	295	12	60	21	5,5	2,2	0,8	0,4	1050
X10CrAl24		800-850/z,v	520-720	280	10	50	17,5	4,7	2,1	1,0	0,4	1150
X15CrNiSi25-20	A	1050-1100/v,z	550-800	230	30		105	37	12	5,7	1,8	1150
X15CrNiSi20-12		1050-1100/z,v	550-750	230	30		80	25	10	4	1,8	1100
X12NiCrSi36-16		1050-1100/z,v	550-800	230	30		80	35	15	5	1,8	1100
X10NiCrAlTi32-20		1050-1100/v	540-740	245	40		85	35	15	5	2,	1050

*F - ferit, A – austenit; z – zrak, v - voda

4.7.6. Primjena čelika za povišene i visoke temperature

Čelici za povišene i visoke temperature primjenjuju se kod termoenergetskih postrojenja za izradu generatora pare (parnih kotlova – slika 29) i izradu plinskih i parnih turbina. Koriste se također za tlačno opterećene dijelove kod kemijskih i procesnih postrojenja i u metalurškim pogonima, te kod motora s unutarnjim izgaranjem, raketa (slika 30) i svemirskih brodova.



Slika 29 – Parni kotao izrađen od ugljičnog (nelegiranog) čelika



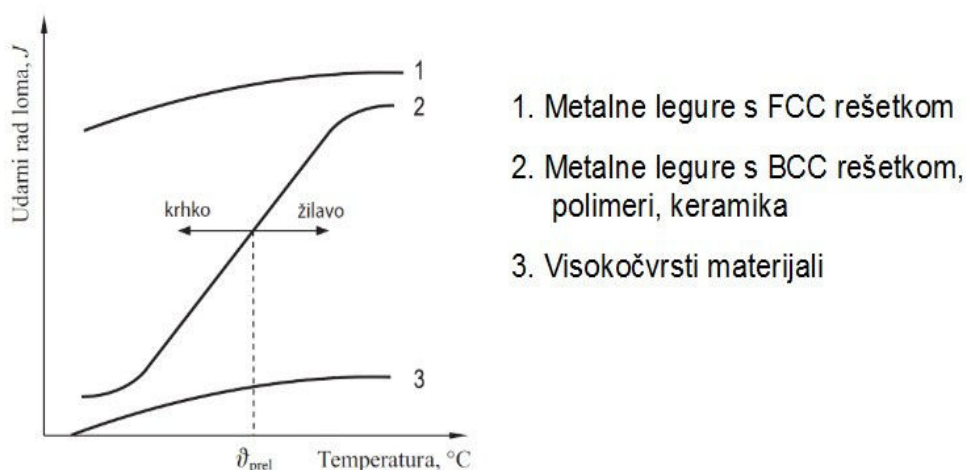
Slika 30 – Kućište raketnog motora izrađeno od visokolegiranog Cr-Ni čelika

4.8. Čelici za niske i snižene temperature

Pod niskim temperaturama podrazumijevaju se one od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa sve do apsolutne ničice. S padom temperature se općenito povisuju: tvrdoća, vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i osjetljivost na urezno djelovanje, a padaju vrijednosti: istezljivosti, udarnog rada loma, kontrakcije presjeka, specifičnog toplinskog kapaciteta, toplinske rastezljivosti i toplinske vodljivosti.

Osnovni zahtjev u primjeni čelika pri niskim temperaturama je dovoljna žilavost odnosno otpornost na pojavu krhkog loma. Kako će sniženje temperature utjecati na promjenu svojstva čelika ovisi ponajprije o njegovoj kristalnoj rešetci. Čelici sa FCC kristalnom rešetkom imaju u pravilu veću otpornost na pad žilavosti pri nižim temperaturama od čelika sa BCC rešetkom.

Vrijednost udarnog rada loma pri radnoj temperaturi i visina prijelazne temperature (slika 31) gotovo su jedini kriteriji za izbor čelika za primjenu na niskim temperaturama. Kao "hladno žilav" definira se onaj čelik koji pri temperaturi od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ postiže vrijednost udarnog rada loma od 27 J ili ima prijelaznu temperaturu žilavosti nižu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za postizanje dovoljno visoke žilavosti pri niskim temperaturama čelici moraju imati posebno podešen kemijski sastav i mikrostrukturu.



Slika 31 – Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi za razne materijale

U primjeni se razlikuju tri osnovne skupine čelika:

Niskolegirani (mikrolegirani) sitnozrnati čelici

To su mikrolegirani čelici povišene čvrstoće koji se u normaliziranom stanju primjenjuju do -50°C , a u poboljšanom stanju do -80°C . Niža prijelazna temperatura dolazi kao posljedica sitnog zrna, dezoksidacije aluminijem i silicijem i više čistoće od klasičnih konstrukcijskih čelika. Kod poboljšanih čelika dodaci Al, Nb i Mn pomiču M_s temperaturu na niže, pa se mikrostrukturne pretvorbe kod toplinske i termomehaničke obrade odvijaju pri nižim temperaturama.

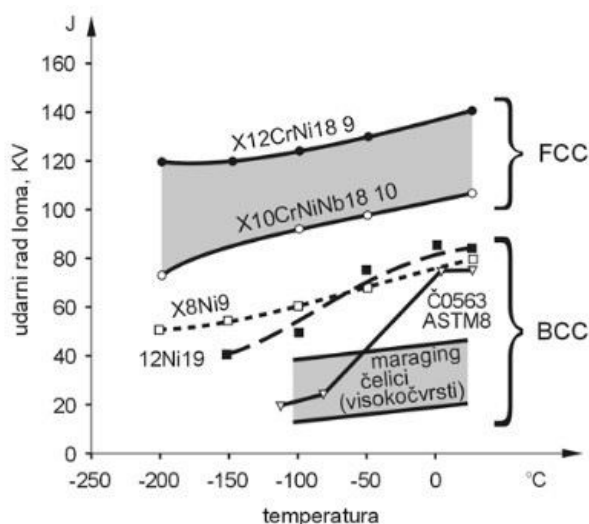
Čelici legirani s Ni (1,5 - 9%) za poboljšavanje

Primjenjuju se u temperaturnom području od -85°C do -200°C . Jedan od najdjelotvornijih elemenata za povećanje žilavosti pri niskim temperaturama je nikal jer pospješuje stvaranje sitnog zrna i vrlo žilavog Fe-Ni martenzita (kod "maraging" čelika) nakon kaljenja. Ovi čelici nemaju veliku otpornost na koroziju kao austenitni čelici i skloni su pojavi krhkosti nakon popuštanja, pa se stoga nakon popuštanja ubrzano hlade.

Cr-Ni i Cr-Ni-N (Nb,Ti), Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N austenitni čelici

Zadržavaju dovoljnu žilavost i pri temperaturama blizu apsolutne nule tako da se primjenjuje za temperature sve do -270°C . Glavni problem u primjeni austenitnih čelika su još nedovoljno istražene mikrostrukturne transformacije austenita u tzv. deformacijski ϵ -martenzit pri niskim temperaturama. Zbog velikog toplinskog rastezanja sniženjem temperature dolazi do znatnijih smanjenja dimenzija, što kod upetih konstrukcija može izazvati naprezanja viša od granice razvlačenja, tj. izazvati hladno očvrnuće, pojavu ϵ -martenzita i predispoziciju za napetosnu koroziju.

Na slici 32 prikazan je utjecaj sniženih temperatura na vrijednost udarnog rada loma tipičnih predstavnika čelika ove skupine.



Slika 32 – Ovisnost KV o temperaturi tipičnih vrsta čelika za rad pri niskim temperaturama

Tablice 22 i 23 daju uvid u kemijski sastav i mehanička svojstva čelika namjenjenih za rad pri niskim temperaturama.

Tablica 22 – Čelici za niske temperature - kemijski sastav

Oznaka čelika	Maseni udio pojedinih elemenata, %									
	C	Si	Mn	Ni	P maks.	S maks.	Mo maks.	V maks.	Nb maks.	Al maks.
11MnNi5-3	0,11	max 0,5	0,7-1,5	0,3-0,8	0,025	0,01	-	0,05	0,05	0,02
13MnNi6-3	0,13	max 0,5	0,85-1,7	0,3-0,85	0,025	0,01	-	0,05	0,05	0,02
12Ni14	0,12	0,15-0,35	0,3-0,8	3,25-3,75	0,02	0,005	-	0,05	-	-
X12Ni5	0,12	max 0,35	0,3-0,8	4,75-5,25	0,02	0,005	-	0,05	-	-
X7Ni9	0,07	max 0,35	0,3-0,8	8,5-10	0,015	0,005	0,1	0,01	-	-
X10Ni9	0,10	0,15-0,35	0,3-0,8	8,5-9,5	0,02	0,005	0,1	0,01	-	-

Tablica 23 – Čelici za niske temperature - mehanička svojstva

Oznaka čelika	R _m , N/mm ²	R _e , N/mm ²	KV, J, pri +20°C	KV, J, (g _{isp})	Grupa čelika po CR ISO 15608
11MnNi5-3	410-530	285	45-50	27 (-60 °C)	9.1
13MnNi6-3	490-610	355	45-50	27 (-60 °C)	9.1
12Ni14	490-640	355	45-50	27 (-100 °C)	9.2
X12Ni5	510-710	390	50-60	27 (-120 °C)	9.2
X7Ni9	680-820	585	100	80 (-196 °C)	9.3
X10Ni9	690-840	510	50	27 (-196 °C)	9.3

4.8.1. Primjena čelika za niske i snižene temperature

Ovi čelici se primjenjuju za spremnike tekućih plinova pod tlakom (slika 33), cjevovode za tekuće plinove i uređaje u tehnici hlađenja. Primjenjuju se također za izradu tlačnih spremnika namjenjenih za uporabu na geografskim širinama gdje se temperature spuštaju ekstremno nisko (polarni i subpolarni predjeli, Sibir,...), a koji bi u normalnim okolnostima mogli biti izrađeni i od običnih čelika.



Slika 33 – Spremnik tekućeg dušika

5. Kompozitni materijali

Kompozitni materijali su heterogeni materijali koji se sastoje od više materijala sa ciljem dobivanja takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.

Glavne prednosti kompozitnih materijala u odnosu na tradicionalne konstrukcijske materijale su viša specifična čvrstoća i specifična krutost, relativno bolja otpornost na koroziju i mogućnost "dizajniranja" svojstava. Nedostaci su: kompliciran popravak kod proizvoda proizvedenih od kompozita, konstrukcijski problemi (spajanje kompozitnih dijelova, izrada provrta), anizotropija svojstava, nelinearno ponašanje materijala, interlaminarna naprezanja i slično.

Svi kompozitni materijali sastoje se od dvije komponente: matrice i ojačala. Uloga matrice je povezivanje ojačala, prenošenje opterećenja na ojačalo i zaštita ojačala od okolnih utjecaja i oštećenja. Matrica mora prijanjati uz vlakna i ne smije kemijski reagirati sa ojačalom. Ona poboljšava žilavost cijele konstrukcije, svojstva u poprečnom smjeru i otpornost na koroziju. Ojačalo mora prije svega imati visoku čvrstoću i visoki modul elastičnosti (krutost), a isto tako po potrebi mora zadovoljavati i neka druga svojstva (toplinska vodljivost, otpornost na trošenje,...). Ukupno ponašanje kompozita ovisi o sljedećem: svojstvima matrice i ojačala, veličini i rasporedu (raspodjeli) konstituenata, volumnom udjelu konstituenata, obliku konstituenata i prirodi i jakosti veze među konstituentima.

Ojačala kod kompozitnih materijala mogu biti u obliku čestica ili vlakana i viskera. Matrice kompozita mogu biti: metalne (Al, Ti, Cu, Mg legure i superlegure), polimerne (poliesterske smole, vinilesterske smole, epoksidne smole, akrili, PA, PP, ABS, PPS, PEEK, PEI itd.) ili keramičke (Al_2O_3 , SiC, ZrO_2 itd.).

Od kompozitnih materijala najčešće se koriste oni sa polimernom matricom čije su prednosti: korozijska postojanost na zraku i u nizu medija, visoka specifična čvrstoća, visoka specifična krutost, jednostavna proizvodnja, i relativno niža cijena u odnosu na ostale kompozite. Kao ojačala kod polimernih kompozita koriste se staklena, aramidna, ugljična i hibridna vlakna. Staklena vlakna se dobivaju iz SiO_2 na temperaturi iznad $1600\text{ }^\circ\text{C}$. Njihova proizvodnja je relativno jednostavna, izvor sirovine za proizvodnju je praktički neiscrpan i jeftina su. Imaju relativno dobra mehanička svojstva, ali nisku žilavost.

Aramidna vlakna su sastavljena od linearnih makromolekula koje su sastavljene od aromatskih skupina povezanih amidnim ili imidnim vezama, od kojih je najmanje 85% neposredno vezano na dva aromatska prstena (aramid – aromatski poliamid). Ova vlakna su izrazito žilava što je povezano sa strukturom, tj. s jedinstvenim mehanizmom loma (širenja pukotine). Vlakna ne pucaju krhko (kao staklena ili ugljična), već se lom događa kao posljedica niza puknuća pojedinačnih molekularnih lanaca, a koja su orijentirana u smjeru vlakana. Ti pojedinačni lomovi apsorbiraju velike količine energije što na makrorazini rezultira s velikim udarnim radom loma. Njihove dobre karakteristike su: visoka čvrstoća i dinamička izdržljivost, otpornost na abraziju, dobra kemijska i toplinska postojanost, samogasiva su i neškodljiva. Loše karakteristike su izrazita anizotropnost mehaničkih svojstava i slaba adhezija sa matricom.

Kod ugljičnih vlakana atomi ugljika su relativno pravilno složeni u kristalnoj rešetci, povezani u ravnini čvrstim kovalentnim vezama u šesterokute koji su međusobno povezani Van der Wallsovim silama. Ovaj tip vlakana ima vrlo visoku čvrstoću i krutost, ali su najskuplja.

Hibridna vlakna predstavljaju kombinacije svih vrsta vlakana (ugljik/aramid, aramid/staklo, ugljik/staklo).

Tlačni spremnici od kompozitnih materijala (slika 34) uobičajeno se proizvode postupkom namatanja koje može biti vijčano, prstenasto ili polarno. Namatanje je vrlo brza i ekonomična metoda kod koje se može regulirati udio smole na vlaknima. Troškovi su manji jer se koriste

pojedinačna vlakna, a ne tkanja. Moguće je postići odlična mehanička svojstva, ako optrećenje djeluje u smjeru vlakana.

S druge strane, ovim je postupkom moguće dobiti jedino konveksan oblik proizvoda, a smještaj vlakana na različite oblike nije uvijek lagan (npr. uzdužno). U slučaju izrade velikih djelova troškovi mogu biti vrlo visoki, a vanjska površina proizvoda nije uvijek estetski prihvatljiva.



Slika 34 – Tlačni spremnici od polimernog kompozita

6. Neželjezne legure

Neželjezne legure koje se koriste za izradu tlačnih spremnika su:

- Al-legure,
- Cu-legure,
- Ti- legure,
- Ni-legure.

Al-legure

Čisti aluminij je lagan, mekan, izdržljiv, istezljiv i deformabilan. Dobro provodi struju i toplinu, daje se dobro zavarivati, ima dobar omjer vlačne čvrstoće i gustoće i potpuno je recikličan. Aluminij vrlo brzo reagira sa kisikom iz zraka i time se na površini stvara sloj Al_2O_3 od nekoliko nm koji je kompaktan što ga čini otpornim na koroziju u dosta medija. Otpornost na koroziju se može još dodatno povećati rafinacijom (povećanjem čistoće).

Aluminij se vrlo često legira bakrom, magnezijem, silicijem, manganom, kromom, cinkom i drugim metalima, i to uglavnom zbog povećanja čvrstoće i tvrdoće. Legiranje uglavnom nepovoljno djeluje na korozijsku postojanost, a najštetnije je u tom pogledu dodavanje bakra koje inače bitno poboljšava mehanička svojstva aluminija.

Tlačni spremnici od aluminija (slika 35) moraju imati deblje stijenke od onih čeličnih, no niža gustoća aluminija to dobro kompenzira. Ukupno gledano aluminijske legure su korozijski postojanije od čelika, ali kod aluminija postoji veća opasnost od oštećenja (savijanje, uleknuća) nego kod čelika.



Slika 35 – Tlačni spremnik izrađen od aluminija

Cu-legure

Legure bakra općenito imaju vrlo visoku otpornost na koroziju. Hladno vučeni bakar ima čvrstoću od 340 N/mm^2 , lako se oblikuje i obrađuje. Legure bakra se dijele na one sa cinkom (mjedi) i na one bez cinka (bronce). Mjedi posjeduju dobru električnu i toplinsku vodljivost, dobra mehanička svojstva, moguće ih je prerađivati i u hladnom i u toplom stanju i imaju dobru otpornost na koroziju. Hladno gnječene mjedi se označavaju kao α -mjedi dok se one toplo gnječene označavaju kao $\alpha+\beta$ -mjedi. Bronce po kemijskom sastavu mogu biti: kositrene, aluminijeve, berilijeve, silicijeve, olovne i olovno-kositrene.

Bakarne legure se kod tlačne opreme uglavnom koriste za armature parnih kotlova.

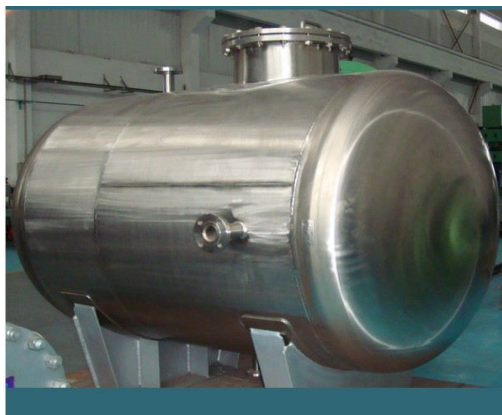
Ti-legure

Legure titana mogu doseći vrijednosti čvrstoće od 1500 N/mm^2 , a gustoća im je oko 40% niža od gustoće čelika. Uz to, imaju značajnu otpornost na umor i puzanje, malu toplinsku rastezljivost i veliku postojanost u raznim agresivnim medijima. Titanove legure su dobro zavarljive pod zaštitnim plinom ili u vakuumu, ali su teško obradljive postupcima odvajanja čestica jer su vrlo žilave, a postoji i opasnost od zapaljenja strugotine. Titan je vrlo skup.

Ni-legure

Nikal ima visoku otpornost na koroziju, dobra mehanička svojstva i lako se obrađuje i oblikuje. Otporan je na koroziju u različitim sredinama, te na djelovanje atmosferskih plinova (na zraku sporo oksidira), vode, halogenih elemenata i sumpora na sobnoj temperaturi, a zagrijavanjem mu se reaktivnost povećava. Prema lužinama je otporan sve do $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Niklove legure su vrlo žilave i zadržavaju dobra mehanička svojstva i pri visokim temperaturama.

Koriste se za izradu tlačnih spremnika u kemijskoj i farmaceutskoj industriji (slika 36).



Slika 36 – Tlačni spremnik izrađen od Ni-legure

7. Zaključak

Tlačni spremnici su konstrukcije kod kojih postoji opasnost od pojave teških nesreća, pa iz toga proizlaze specifični zahtjevi na materijale od kojih su takve konstrukcije izrađene. Od kojeg će materijala spremnik na kraju biti izrađen, ovisi o namjeni spremnika, uvjetima eksploatacije, cijeni materijala i drugim faktorima, a zahtjevi na materijale od kojih se izrađuju tlačni spremnici propisani su pravilnicima i normama.

Nemoguće je općenito odrediti koji je materijal ili grupa materijala najbolja za izradu tlačnih spremnika. Svaki materijal koji zadovoljava osnovne zahtjeve ulazi kao jedna od opcija koja se može odabrati, a da li će na kraju biti odabran najprikladniji materijal, na kraju najviše ovisi o znanju i iskustvu inženjera. U današnje vrijeme tlačni spremnici se i dalje najčešće proizvode od čelika, no sve češća je uporaba i drugih vrsta materijala, ponajprije kompozitnih, zbog više specifične čvrstoće i mogućnosti "dizajniranja" svojstava. Postoje mnogi primjeri u praksi gdje se za izradu tlačnih spremnika koriste razne vrste materijala. Kod boca za ronjenje koriste se uglavnom aluminij i nehrđajući čelici, a oba izbora materijala imaju svoje mane i svoje prednosti. Boce za ronjenje izrađene od čelika imaju tanje stjenke jer čelik ima višu čvrstoću od aluminija, pa unatoč tome što aluminij ima značajno nižu gustoću od čelika, čelične boce za ronjenje imaju manju masu. Čelične boce za ronjenje uz to imaju veću otpornost na pojavu loma, veću otpornost na puzanje i manju vjerojatnost da će doći do oštećenja kao što je recimo nekakvo uleknuće zbog udarca. S druge strane aluminijske boce za ronjenje su puno otpornije na pojavu korozije.

Današnji razvoj materijala odvija se primjenom znanstvenih pristupa, interdisciplinarnom suradnjom fundamentalnih i primjenjenih disciplina, kvantitativnih metoda i računala. Po nekim procjenama u posljednjih 60-tak godina u primjenu je ušlo toliko vrsta materijala koliko u svim prethodnim stoljećima zajedno i danas raspoložemo sa 70 – 100 000 različitih vrsta tehničkih materijala. Dalji razvoj materijala imat će utjecaja i na trendove u proizvodnji tlačnih spremnika. Ne samo na izbor materijala od kojih će se tlačni spremnici za pojedine namjene izrađivati, već i na konstrukcijske karakteristike samih tlačnih spremnika (oblik, masa, nosivost itd.).

8. Literatura

- [1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [2] Matković T., Matković P., *Fizikalna metalurgija I*, Metalurški fakultet, Sisak, 2009.
- [3] Novosel M., Krumes D., *Posebni čelici*, SF, Slavonski Brod, 1998.
- [4] <http://www.steelnumber.com/>, preuzeto 3.9.2016.
- [5] Kruz V., *Tehnička fizika*, Školska knjiga, Zagreb, 1963.
- [6] Kraut B., *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, 2009.
- [7] Novosel M., Cajner F., Krumes D., *Alatni materijali*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
- [8] Freyer D., Harvey J., *High pressure vessels*, Springer, Berlin, 1998.
- [9] Narodne novine: *Pravilnik o tlačnoj opremi*
- [10] EN 13445-2:2009: *Unfired pressure vessels - Part 2: Materials*

9. Prilog:

1. CD